

An aerial photograph of a diverse crowd of people walking across a crosswalk on a city street. A complex network of thin, light blue lines is overlaid on the image, connecting various individuals, which visually represents digital connectivity and data flow. The text 'SECTORBEELD 2022' is positioned in the upper left area of the image.

SECTORBEELD 2022

FUNDAMENT ONDER DE DIGITALE SAMENLEVING

BEELD VAN
DE NEDERLANDSE
INFORMATICA

GEZONDHEID

De zorg is één van de domeinen waar veel verwacht wordt van de implementatie van de sleuteltechnologieën AI en (Big) Data Analytics. Ziekenhuizen registreren data in overvloed en in vele vormen: klinische patiëntgegevens, genetische informatie, medische beelden, rapportages van consulten en data uit wearables. Data liggen aan de basis van diagnose en besluitvorming, risico analyses en monitoring, en als real-time ondersteuning bij operatie of ingreep. Nu de hoeveelheid data per patiënt zoveel toeneemt, wordt het voor zorgprofessionals alleen steeds lastiger om al die informatie mee te nemen. AI is in staat snel patronen te herkennen en kan besluitvorming ondersteunen door de data van een patiënt te vergelijken met de data van eerdere patiënten. Zo worden zorgverleners geholpen bij het selecteren van de meest geschikte behandeling.

De COVID pandemie heeft het onderzoek naar een wereldwijd gedistribueerde data infrastructuur in een versnelling gebracht. Hiermee kan in de toekomst via distributed learning sneller oog en grip op een opkomende pandemie verkregen worden.

AI en Big Data dienen niet alleen ter ondersteuning van klinische besluitvorming, maar ook als hefboom voor de snellere ontwikkeling van nieuwe medicijnen en personalized medicine, en in de automatisering van de zorgketen. Hierdoor wordt de patiënt niet alleen beter en sneller geholpen maar blijft de zorg ook in de toekomst betaalbaar.



INHOUD

MANAGEMENTSAMENVATTING	4
BELANGRIJKE BEGRIPPEN EN AFKORTINGEN	7
TEN GELEIDE	9
INFORMATICA ALS BASIS VOOR EEN STERKE DIGITALE SAMENLEVING	13
DE ROL VAN DE UNIVERSITEITEN – MAATSCHAPPELIJKE IMPACT	15
LANDELIJKE ORGANISATIE	19
DE SECTOR INFORMATICA: ORGANISATIE, KWALITEIT EN OMVANG	19
KWALITEIT EN OMVANG VAN ONS ONDERZOEK	21
KWALITEIT EN OMVANG VAN ONS ONDERWIJS	23
ONZE ANDERE ONDERWIJSVORMEN	26
KANSEN EN KNELPUNTEN	29
DE SECTORPLANDOELEN: HET CREËREN VAN RUST EN RUIMTE	29
DE AANHOUDENDE MISMATCH TUSSEN VRAAG EN AANBOD	30
HET VINDEN VAN DE BALANS TUSSEN FUNDEREND EN TOEPASSINGSGERICHT	
ONDERZOEK	31
HET VERWEZENLIJKE VAN ONZE AMBITIES	33
BIJLAGEN	35

HET FUNDAMENT ONDER DE DIGITALE SAMENLEVING: BEELD VAN DE NEDERLANDSE INFORMATICA (2022)

MANAGEMENTSAMENVATTING

In het eerste sectorplan Bèta en Techniek 2018-2025 is aan de sector Informatica structureel 8,4 miljoen Euro toegekend voor het verstevigen van het wetenschappelijk fundament. De stormachtige groei en ontwikkelingen in de sector en de toenemende studentenaantallen zijn in 2022 reden voor een additionele aanvraag voor een structurele financiële injectie in de sector.

De wereld digitaliseert en Nederland doet mee in de voorhoede. In de Europese **Digital Economy and Society Index** (DESI) staat Nederland de afgelopen jaren telkens bij de koplopers. Nieuwe ontdekkingen, technieken en toepassingen in de digitale informatie- en communicatietechnologie (ICT) versnellen de ontwikkelingen en innovatie in vele wetenschappelijke disciplines, de dienstverlening, het bedrijfsleven en daarmee in de maatschappij als geheel. Alle sectoren en beroepen ondervinden deze gevolgen van de steeds verdergaande digitalisering. Het wordt daarnaast steeds duidelijker dat digitalisering onmisbaar is voor het adresseren van belangrijke maatschappelijke opgaven, zoals de transitie naar een duurzame energie- en voedselvoorziening, betere zorg en onderwijs of een goede bereikbaarheid. Onderzoek speelt hierin een cruciale rol: innovaties zoals Artificiële Intelligentie (AI), waaruit nu een overvloed aan nieuwe maatschappelijke en zakelijke mogelijkheden voortkomt, zijn geëvolueerd vanuit een solide infrastructuur voor fundamenteel onderzoek die tientallen jaren geleden is opgezet.

Ondanks haar goede uitgangspositie en een uitstekende digitale infrastructuur loopt Nederland, volgens de **Digital Intelligence Index 2020**, het risico om nu achterop te raken. Met een stevig digitaliseringsbeleid gericht op het stimuleren van wetenschap, bedrijfsleven, ‘startups’, ‘scale-ups’, kenniscoalities en overheid wil de regering de handen ineen slaan om de kansen die digitale technologie biedt te verzilveren (*regeerakkoord 2021, p30*). Het sterke wetenschappelijke informaticaveld in Nederland biedt een goede uitgangspositie om de geambieerde voortrekkersrol van een stevig fundament te voorzien maar extra investeringen in onderwijs en onderzoek zijn noodzakelijk om de verdere transitie in goede banen te leiden.

Als een van de wetenschappelijke pilaren onderliggend aan de ontwikkelingen in de ICT-technologie, wil de sector Informatica met additionele investeringen uit deze sectorplanronde (2022-2029) een aantal doelen bereiken: meer onderwijs- en onderzoekscapaciteit genereren, meer diversiteit in de staf populatie en meer rust en ruimte creëren om aantrekkelijker als werkgever te worden en op deze manier het talent te kunnen behouden. De behoefte aan hoogopgeleide informatici is groter dan het aantal alumni dat de universiteiten op dit moment kunnen afleveren. Een belangrijk onderdeel van dit plan is de verlaging van de buitenproportioneel hoge student/staf-ratio van de Nederlandse informaticaopleidingen om

Informaticaonderzoek speelt een cruciale rol in het adresseren van de maatschappelijke en wetenschappelijke uitdagingen die digitalisering en de digitale transformatie met zich meebrengen

de kwaliteit van het onderwijs te kunnen waarborgen. Daarnaast vragen de snelle maatschappelijke en digitale ontwikkelingen om informatici met diepgravend inzicht in o.a. AI, the Internet of Things, big data analytics, (duurzame) software ontwikkeling en cybersecurity. De nieuwste inzichten worden daarom versneld in het curriculum ingebracht.

Additionele structurele investeringen via dit tweede sectorplan die passen bij de aanhoudende en substantiële groei van de sector Informatica in de afgelopen jaren, zullen de universiteiten in staat stellen via disciplinair en interdisciplinair onderzoek en onderwijs blijvend een bijdrage te leveren aan de ontwikkeling van nieuwe kennis, toepassingen en innovaties in de eigen sector en in de vele andere sectoren waar digitalisering inmiddels een belangrijke aanjager is van nieuwe ontwikkelingen en ontdekkingen. Door, naast toepassingsgericht onderzoek en innovatie ten behoeve van het verdienvermogen van Nederland, in te zetten op *blue sky research* zal ons land zijn koppositie kunnen behouden en niet alleen de uitdagingen van nu maar ook die van de toekomst beter het hoofd kunnen bieden. Het versterken van het Nederlandse informaticafundament, zal in belangrijke mate bijdragen aan het missie-gedreven innovatiebeleid van de overheid, de vragen en routes uit de Nationale Wetenschapsagenda, de Europese digitaliseringsstrategie en in het realiseren van de *Sustainable Development Goals*.



VEILIGHEID

De digitale samenleving beïnvloedt meer en meer het leven van burgers. Tegelijkertijd neemt het vertrouwen in die digitale samenleving juist af door toenemende zorgen over lerende algoritmen, datalekken, digital surveillance, en nepnieuws. Cybermisdadigheid richt grote schade aan in de Nederlandse maatschappij en economie. Onderzoekers werken daarom continu aan het blootleggen van criminele capaciteiten en aan het bedenken van nieuwe verdedigingsmiddelen voor een veilige digitale wereld: formele methoden die correctheid garanderen, operating systemen die robuust zijn tegen aanvallen, databases die de anonimiteit van data garanderen, lerende algoritmen die compenseren voor bias in datasets, en methoden voor het detecteren van ongewenste uitingen op sociale media. Nederlandse cryptografie vormt de kern van nieuwe internationale standaarden om gegevens te beveiligen. Automatische verificatie op basis van fuzzing helpt fouten in software tijdig te identificeren. Helaas blijkt uit onderzoek dat niet alleen software kwetsbaar is, maar ook de hardware. Terwijl softwarefouten met een simpele update verholpen kunnen worden, is dat voor hardware kwetsbaarheden veel moeilijker, en vaak zelfs onmogelijk. De opkomst van open hardware is daarom een interessante ontwikkeling.

BELANGRIJKE BEGRIPPEN EN AFKORTINGEN

AI	Artificial intelligence, kunstmatige intelligentie
ICT	Informatie- en Communicatietechnologie
ICT-sector	De Nederlandse sector volgens de definitie van het CBS, bestaande uit: de ICT-industrie, de groothandel in ICT-apparatuur en de ICT-dienstensector
Informatica	Het vakgebied van de digitale informatieverwerking en communicatie en vormt de basis voor onder andere software, artificiële intelligentie (AI), data science en computersystemen, en voor ICT in het algemeen
IoT	Internet of Things
IPN	ICT research platform Nederland
KIA	Kennis en Innovatieagenda
ML	Machine Learning of Machinaal Leren
NWA	Nationale Wetenschapsagenda
NWO	Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek
Sector Informatica	De academische kennisinstellingen met een aanzienlijke informatica onderwijs- en/of onderzoeksfocus, verenigd in IPN

LANDBOUW, VOEDSEL & WATER

Samen met onderzoekers uit diverse andere vakgebieden zijn informatici betrokken bij het mogelijk maken van de urgente transitie naar een toekomstbestendige landbouw en voedselketen. Innovaties waarvan veel wordt verwacht zijn het ontwikkelen van robuuste gewassen en gezonde veerassen; het minimaliseren van gebruik van grond- en hulpstoffen; en het integreren van voedselproductie en ecosysteemdiensten. Machine leren (ML) en deep learning (DL) bieden enorme kansen in deze complexe toepassingen en worden wijd gebruikt voor analyse van moleculaire processen, organismen en populaties, met een belangrijke rol in veredeling van planten en dieren. Digital twinning, remote sensing en Virtual en Augmented Reality (VR/AR) worden ingezet in precisie landbouw en in modellering en beslisondersteuning van het landbouwproces. Daarnaast brengen we de ecologische footprint van de voedselketen in kaart, *from farm to fork*, zodat we duurzamere keuzes kunnen maken over wat we importeren en wat op ons bord leggen.



TEN GELEIDE

HET STARTPUNT: SECTORPLAN BÈTA EN TECHNIEK 2018-2025¹

In 2019 is een beknopt domeinbeeld gepubliceerd voor de domeinen Bèta en Techniek. In het Bètadomein werden de disciplines Wiskunde, Informatica, Natuurkunde en Scheikunde (samen het subdomein WINS) geprioriteerd om mee te gaan in het eerste sectorplan Bèta en Techniek 2018-2025 (in het verdere document aangeduid als Sectorplan 1). De sectorplancommissie rapporteerde eind mei van dit jaar (2022) in een tussenevaluatierapport over de voortgang van dit sectorplan, dat inmiddels halverwege is, aan de minister van Onderwijs, Cultuur en Wetenschap (OCW).

AANLEIDINGEN VOOR EEN TWEEDE SECTORPLAN INFORMATICA EN EEN NIEUW SECTORBEELD

Onderzoek. De gehonoreerde middelen uit Sectorplan 1 zijn met succes ingezet voor het verstevigen van het informaticafundament door het invullen van vaste wetenschappelijke stafposities op zeven focusgebieden. Deze investeringen zijn noodzakelijk om gelijke tred te kunnen houden met de digitale revolutie en om de grote maatschappelijke uitdagingen het hoofd te kunnen bieden. Informaticaonderzoek speelt een cruciale rol in het adresseren van de uitdagingen die digitalisering en de digitale transformatie met zich meebrengen en bij het vormgeven van de mogelijkheden die zich aandienen voor een veilige, welvarende en duurzame toekomst voor iedereen. In haar recent (2021) gepubliceerde visie² noemt **ICT research platform Nederland** (IPN) het funderend onderzoek cruciaal als motor van de digitale samenleving. De investeringen uit Sectorplan 1 zijn daarin nog niet toereikend volgens IPN. Uit de visie: “Op dit moment lopen de investeringen in fundamenteel informatie- en communicatietechnologie (ICT)-onderzoek aanzienlijk achter bij het maatschappelijke en wetenschappelijke belang van het vakgebied.” De tussenevaluatie van Sectorplan 1 laat dan ook zien dat de deelnemende universiteiten aanvullend ongeveer eenzelfde hoeveelheid staf hebben aangetrokken met eigen middelen³ ter verdere versteviging van hun gekozen profiel.

Onderwijs. De achterblijvende financiering voor fundamenteel onderzoek is niet het enige knelpunt voor verdere ontwikkeling en innovatie in de Nederlandse sector Informatica. De continue ontwikkelingen op het gebied van ICT, en de vele toepassingen die daaruit voortkomen, hebben tot gevolg dat het bekostigde en onbekostigde informaticaonderwijs

¹ De in deze alinea genoemde bestanden vindt u hier (sectorplan-betatechniek.nl)

² <https://ict-research.nl/2021/11/ipn-vision-strengthening-the-foundations-for-a-strong-digital-society/>

³ Grotendeels verkregen door toegenomen inkomsten door toenemende studentenaantallen

sterk in ontwikkeling is. De relevantie en dynamiek van de sector hebben grote aantrekkingskracht op een toenemend aantal studenten die hun weg vinden naar een informaticaopleiding. Tussen 2018 en 2021 zijn de studentenaantallen in de informatica-opleidingen met een vergelijkbaar percentage gestegen (43%) als de staf, waardoor de te hoge student/staf ratio (>30) niet is afgenomen. Om up-to-date te blijven worden nieuwe inzichten en maatschappelijke implicaties versneld ingebracht in het bachelor- en master-curriculum. Daarnaast wordt in co-creatie met externe partners onderwijs ontwikkeld met als doel ook de kennis van zittende professionals courant te houden. Dit uit zich in diverse korte en langere trainingen en leergangen, maar ook in volledige onderwijsprogramma's zoals executive masterprogramma's en Engineering Doctorates (EngD, specifiek voor de 4TU). De onderwijsdruk die al hoog was, is in de recente periode door deze combinatie van factoren nog verder opgelopen.

Kortom, door de onstuimige ontwikkelingen in de maatschappij, wetenschap en innovatie en het onderwijs, hebben de gezamenlijke inspanningen nog niet geleid tot de gewenste rust en ruimte voor de sector. Dit is aanleiding voor IPN om, namens de sector, een tweede sectorplanaanvraag bij de minister van OCW in te dienen als onderdeel van de huidige ronde nationale Sectorplannen 2023-2029. De sector wil de indiening van dit tweede sectorplan Informatica daarnaast aangrijpen om de IPN-visie en (de impact van) recente maatschappelijke en wetenschappelijke ontwikkelingen⁴ mee te nemen in een aangescherpt sectorbeeld.

⁴ Denk hierbij bijvoorbeeld aan de impuls in AI onderzoek en innovatie via de investering in AINed vanuit het Nationaal Groeifonds, de versnelling in digitalisering door de COVID-19 pandemie en de uitdagingen op het gebied van digitale inclusie, veiligheid en betrouwbare digitale dienstverlening die dat met zich mee heeft gebracht, maar ook het belang van onderzoek naar sustainable computing en de rol van digitalisering in het behalen van de klimaatdoelstellingen.

MENSGERICHTE AI

Met grote vooruitgang in neurale netwerken, computer-visie, natuurlijke taalverwerking en meer, wordt AI een vast onderdeel van ons dagelijks leven. We hebben nu het uitzonderlijke vermogen om 'intelligentie' aan machines toe te voegen, waardoor systemen mensen kunnen helpen en faciliteren bij een breed scala aan taken. Er blijven echter veel vragen over: hoe verankeren we deze 'intelligentie' op een verantwoorde, rechtvaardige en duurzame manier? Wie is betrokken bij het ontwerp van deze systemen en wie kadert de discussie? Wat verwachten we van onze AI-gebaseerde systemen? Wat zijn de nieuwe ontwerpprocessen en -patronen om deze systemen betrouwbaar en succesvol te maken voor individuen, gemeenschappen en de samenleving?

Informaticaonderzoekers werken aan ontwerpprincipes in het tijdperk van AI. Er wordt onderzoek gedaan naar machineleeralgoritmes en evaluatiemethoden die erop gericht zijn om de voordelen van intelligente assistentie zo goed mogelijk te combineren met maatschappelijke waarden en kaders, en daarmee AI-systemen te bouwen die ons allemaal ten goede komen.



INFORMATICA VOOR EEN DUURZAME TOEKOMST

De maatschappelijke opgave van de energietransitie stelt in alle sectoren hoge eisen aan het innovatievermogen. De inzet van intelligente technologie kan als hefboom dienen in het realiseren van onze ambities in het kader van de energietransitie en de Europese Green Deal. Informaticaonderzoekers werken daarom onder meer aan zelflerende algoritmen om de vraag naar elektriciteit af te stemmen op het aanbod (dat meer en meer afhankelijk is van het weer), in plaats van (zoals nu) het elektriciteitsaanbod van de centrale af te stemmen op de vraag. Een belangrijk hulpmiddel hierbij zijn Digital Twins, bijvoorbeeld van het elektriciteitsnet.

Tegelijkertijd vormt ICT-infrastructuur een grootverbruiker van energie, verantwoordelijk voor 5-9% van het Nederlandse elektriciteitsverbruik. Informaticaonderzoek richt zich dan ook op onderwerpen als het verbeteren van de energie-efficiëntie van datacenters (slimmere verdeling van gegevens en services), het terugdringen van energieverbruik door 'slimme apparaten' in het Internet-of-Things (programmeermodellen voor apparaten in een lage-energiestand), en kostenreductie voor AI (door lagere kosten voor het trainen van deep learning modellen, maar ook met alternatieven als bio-inspired hardware en neuromorphic computing). Terugdringen van het energieverbruik van software wordt belangrijk. Dit leidt tot onderzoek naar methoden en technieken om software engineers in staat te stellen energieverbruik systematisch mee te laten wegen bij de ontwikkeling van nieuwe software systemen.

INFORMATICA ALS BASIS VOOR EEN STERKE DIGITALE SAMENLEVING

INFORMATICA: FUNDAMENT EN TOEPASSING IN ÉÉN

Informatica, het fundament onder de digitale samenleving. Informatica is het vakgebied van de digitale informatieverwerking en communicatie en vormt de basis voor onder andere software, artificiële intelligentie (AI), data science en computersystemen, en voor ICT in het algemeen. Nieuwe ontdekkingen, technieken en toepassingen in de ICT volgden elkaar in het afgelopen decennium in rap tempo op waardoor een verregaande digitale samenleving is ontstaan. Deze digitale transformatie, die nu opvolging vindt in hyperautomatisering, heeft de manier waarop we leven en werken ingrijpend veranderd. ICT is tegenwoordig zo verweven met de samenleving dat beide onlosmakelijk met elkaar zijn verbonden. We hebben het punt bereikt waarop grote delen van de maatschappij niet meer kunnen functioneren als digitale systemen uitvallen. Daar komt bij dat digitale systemen zo complex zijn geworden dat we specifieke kennis/expertise nodig hebben om uitvallen te voorkomen. De Nederlandse ICT-sector is in recente jaren met 40% gegroeid naar ongeveer 6% van de arbeidsmarkt en een voorspelde groei naar 10% in 2030⁵. Er is een stijgende vraag naar hoogopgeleide ICT-professionals met kennis en vaardigheden op het gebied van o.a. de snel evoluerende digitale technologieën op het gebied van AI, Internet of Things (IoT), big data analytics en cybersecurity. De verdergaande digitalisering heeft daarnaast tot gevolg dat het werk van niet ICT-personeel steeds meer digitale basisvaardigheden vereist.

NATIONALE EN EUROPESE BELEIDSAGENDA'S

Informatica in de Nederlandse beleidsagenda's: toepassing en enabler van innovatie. Informatica is als sleuteltechnologie⁶ de drijvende motor achter zowel maatschappelijke innovaties als innovaties in veel andere wetenschappelijke disciplines. Digitale technologie is integraal onderdeel van de meeste, zo niet alle 25, routes van de Nationale Wetenschapsagenda (NWA). In diverse routes worden (nieuwe) digitale technieken ontwikkeld en/of toegepast bij het adresseren van maatschappelijke vraagstukken. In de routes 18, 20, 21 en 25 staat de ontwikkeling en implementatie van ICT zelf centraal⁷. De Topsector ICT (**Dutch Digital Delta**) is dan ook één van de tien topsectoren in het missiegedreven topsectoren- en innovatiebeleid van de Nederlandse overheid (zie Figuur 1). De topsector prioriteert vijf sleuteltechnologieën (AI, Big Data Analytics, Security, Future Network Services en Blockchain) welke goed corresponderen met de agenda van IPN.

⁵ Zie bijlage 2 voor een uitgebreide arbeidsmarktanalyse.

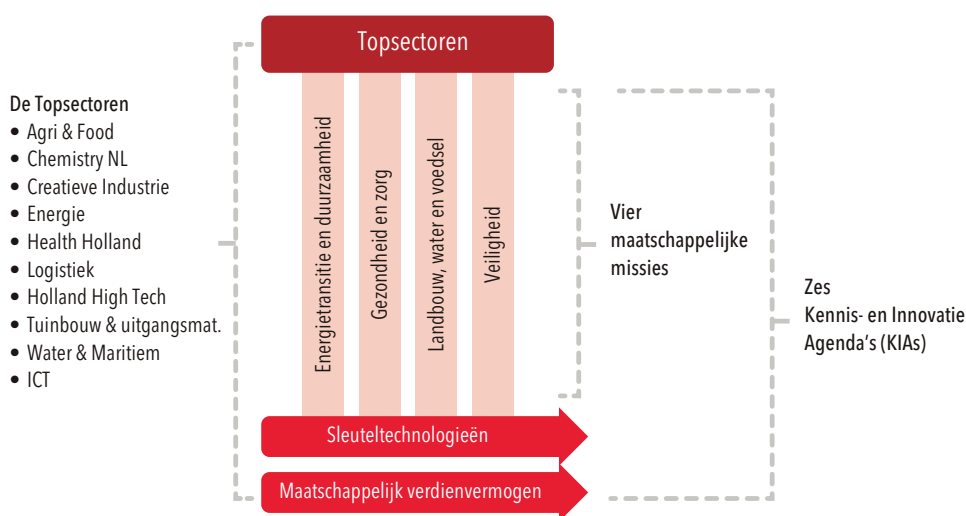
⁶ Een sleuteltechnologie is een technologie met een breed toepassingsgebied in verschillende innovaties en/of sectoren

⁷ Quantum en nano-revolutie (route 18), smart industry (route 20), smart/liveable cities (route 21), en big data (route 25)

In de onderliggende Nederlandse Kennis en Innovatieagenda's (KIAs) verwoorden de tien Nederlandse topsectoren gezamenlijk hun ambitie op het gebied van de vier maatschappelijke missies, de sleuteltechnologieën en het maatschappelijk verdienvermogen. ICT is onderdeel van de doorsnijdende sleuteltechnologieën en daarmee, net als bij de NWA routes, verweven in alle maatschappelijke missies.

Informatica en digitalisering in de internationale beleidsagenda's. Niet alleen Nederland herkent dat ICT als fundament een belangrijke motor is voor sociale en economische groei. De United Nations identificeren ICT als 'key enabler' voor het bereiken van de doelen van de Sustainable Development Goals 2030 (SDGs)⁸, en de Europese Unie (EU) zet met haar Digitale Agenda 2020-2030 en diverse investeringsprogramma's fors in op digitalisering en digitale technologie, digitale inclusie en digitale autonomie. De EU richt zich in haar strategie met name op de doorontwikkeling van AI⁹. Daartoe wil ze in de periode 2021-2027 één miljard euro per jaar investeren vanuit **Horizon Europe**, en het **programma Digital Europe**¹⁰. Belangrijke andere Europese investeringsprogramma's voor de ICT zijn de **Connecting Europe Facility voor digitale infrastructuur**, de **herstel- en veerkrachtfaciliteit** (RRF fondsen) en de structuurfondsen. Op het gebied van digitalisering sluiten de Nederlandse KIAs inhoudelijk aan bij deze Europese beleids- en investeringsstrategie¹¹.

FIGUUR 1. HET NEDERLANDSE MISSIEGEDREVEN TOPSECTOREN- EN INNOVATIEBELEID



Legenda: De topsectoren formuleren hun ambitie op het gebied van de vier maatschappelijke missies, de sleuteltechnologieën en het maatschappelijk verdienvermogen in zes Kennis en Innovatie Agenda's.

⁸ Digital technologies to achieve the UN SDGs (itu.int)

⁹ Europese commissie (2018) mededeling Kunstmatige Intelligentie voor Europa. COM(2018)237

¹⁰ Europese commissie (2021) Coordinated plan on Artificial Intelligence Review. COM(2021)205

¹¹ Het begrip sleuteltechnologie in de KIAs omvat zowel de Key Enabling Technologies (KET's) als de Future and Emerging Technologies uit de Europese programma's Horizon 2020 en diens opvolger Horizon Europe.

DE ROL VAN DE UNIVERSITEITEN – MAATSCHAPPELIJKE IMPACT

De uitdagingen voor de informatica worden sterk beïnvloed door de digitaliseringsgolf die door de samenleving gaat. De ICT komt steeds dichterbij het individu. Dit brengt wetenschappelijke, technische, maatschappelijke en ethische uitdagingen met zich mee. De universiteiten leveren met het informaticaonderwijs en -onderzoek een onmisbare bijdrage aan het adresseren van deze uitdagingen.

Door het genereren van nieuwe wetenschappelijke kennis en het opleiden van een nieuwe generatie wetenschappers en professionals met diepgaande informaticakennis stellen we de samenleving, de beleidsmakers en de internationale gemeenschap in staat om de digitale transitie van de samenleving van een stevig fundament te voorzien, en om deze met diverse (nieuwe) toepassingen in goede banen te leiden.

Vrij naar: Een stevigere basis voor een sterke digitale samenleving - IPN visie

Als belangrijkste toegangspoort naar academisch ICT-onderzoek in Nederland zet IPN zich met haar leden in voor een mooie en duurzame toekomst voor onze digitale samenleving via de volgende twee missies:

- Het ontwikkelen van toekomstige maatschappelijke gamechangers door ICT-onderzoek;
- Het opleiden van een nieuwe, diverse, generatie ICT-onderzoekers en professionals.

IPN doet dit in samenwerking met belangrijke besluitvormers bij de overheid, het bedrijfsleven en de samenleving.

KADER I

IMPACT DOOR PUBLIEK-PRIVATE SAMENWERKINGEN - KENNISDELING EN GEZAMENLIJK ONDERZOEK

Een belangrijk onderdeel van de maatschappelijke missie (zie Kader I) is het ontwikkelen van toekomstige gamechangers door ICT-onderzoek, waar het fundamenteel en toepassingsgericht informaticaonderzoek aan de universiteiten in samenwerking met andere kennisinstellingen, non-profit organisaties, overheden en het bedrijfsleven (waaronder het MKB) een cruciaal onderdeel van is. Dit uit zich onder meer in studenten(afstudeer)projecten bij bedrijven en instellingen, die direct tot waardecreatie leiden en kennis op hun relevantie toetsen. Alle universiteiten zijn (individueel en/of gezamenlijk) betrokken bij meerdere publiek-private samenwerkingen, hetgeen o.a. tot uiting komt in diverse vormen van gezamenlijk onderzoek, van (duale) promovendi en samenwerking in consortia tot onderzoek in opdracht, in proeftuinen, hubs en fieldlabs. Een bijzonder voorbeeld hiervan zijn de landelijke Innovation Centers for Artificial Intelligence (ICAI), zie onderstaand kader (Kader II).

Innovation Centers for Artificial Intelligence

De landelijke Innovation Centers for Artificial Intelligence (ICAI-labs) zetten sinds 2018 via een specifieke formule in op samenwerking in onderzoek. Deze labs hebben een looptijd van vijf jaar waarin onderzoek wordt uitgevoerd in opdracht van een private partner (of overheidspartner) door tenminste vijf promovendi per lab. In 2022 telt de ICAI structuur 29 labs.

KADER II

Met regelmaat resulteren deze samenwerkingen in nieuwe patenten, spin-off bedrijven/ start-ups en open source code die breed ingezet wordt in diverse domeinen. Nederlandse wetenschappelijke resultaten worden niet alleen wereldwijd geciteerd, maar zijn ook waardevol voor de ontwikkeling van nieuwe toepassingen in de verschillende maatschappelijke missies; Gezondheid en zorg, Energie en duurzaamheid, Landbouw, water en voedsel, en Veiligheid.

Maatschappelijke verwevenheid blijkt ook uit de vele onderzoekers en hoogleraren die deeltijdposities binnen publieke organisaties, de overheid en het bedrijfsleven bekleden en/of lid zijn van adviesraden en belangenverenigingen. Hierdoor vindt academische kennis direct zijn weg naar zowel de beroepspraktijk als de beleidsagenda's. **COMMIT2DATA**, de **Nederlandse AI-Coalitie** en het daaraan gelieerde Groeifonds programma **AiNed**, de **Dutch Blockchain Coalitie**, **Future Network Services** en **dcypher** geven binnen de Topsector ICT vorm aan publiek-private samenwerking tussen informatici, bedrijven en overheden.

IMPACT DOOR ONDERWIJS EN OUTREACH

Om gelijke tred te houden met de digitale revolutie is het essentieel dat we voldoende deskundigen opleiden en het algehele niveau van digitale geletterdheid verhogen. De arbeidsmarkt en de universiteiten hebben behoefte aan meer, en een diverse populatie van, mensen met diepgaande ICT-kennis. De academische informaticaopleidingen zijn populair en doordat ICT een sleuteltechnologie is, die bijdraagt aan de versnelling van de ontwikkelingen in veel andere domeinen, worden informaticacursussen en -minoren ook steeds vaker aangeboden als onderdeel van bachelor- en masteropleidingen in andere sectoren en domeinen. Ook de vraag naar onderwijs voor professionals is sterk toegenomen. De universiteiten spannen zich in om in alle vormen van onderwijs een curriculum aan te bieden dat state-of-the-art is en aansluit bij recente technologische en maatschappelijke ontwikkelingen.

De digitaliseringsgolf stelt ons daarnaast voor een brede maatschappelijke uitdaging in de groeiende behoefte aan digitale kennis en vaardigheden. Digitale inclusie en digitale geletterdheid zijn daarmee belangrijke nationale en internationale thema's. Dit vraagt om diverse vormen van educatieve outreach richting de volwassen populatie én richting scholieren in het basis- en middelbaar onderwijs. Via o.a. samenwerkingen met musea, openbare lezingen, bijdragen aan festivals, podcasts, lesmateriaal en op maat gemaakte cursussen voor het betrekken van scholieren, zetten de universiteiten zich op diverse manieren in. Veel ervaring met betrekking tot de outreach richting het middelbaar en basisonderwijs is opgebouwd bij het **Platform Talent voor Technologie** (voorheen Platform Bèta Techniek) en daarnaast



DIGITALE VAARDIGHEDEN IN HET ONDERWIJS

Met een computer kunnen omgaan is één, maar ook echt weten hoe een computer werkt en hoe je problemen met een computer kunt oplossen is een heel ander verhaal. Computational thinking is een essentiële 21st century skill en is simpel vertaald 'het denken als een computer'. Een probleem eerst analyseren en daarna oplossingen bedenken zoals een computer die zou kunnen uitvoeren. Aan de hand van een programmeertaal kun je leren om in logische stapjes een probleem op te lossen. Daarbij is creativiteit en een oplossend denkvermogen nodig.

'Computational Thinking Education' is een spannend vakgebied dat zich richt op de ontwikkeling van onderwijsmethoden voor computational thinking in het basis- en voortgezet onderwijs. Nederlandse onderzoekers in dit vakgebied bouwden een nieuwe programmeertaal voor basisschoolleerlingen: Hedy. Spelenderwijs leren kinderen met Hedy interactieve verhalen maken of levende tekeningen en zelfs liedjes. Zo leren ze dat programmeren leuk is en haalbaar, voordat het complexer wordt. In het voortgezet onderwijs zetten we in op authentieke challenges in context waarbij leerlingen in de schoolvakken NaSK, Biologie en Scheikunde bijvoorbeeld leren robots met sensoren te programmeren met de 'Sense-Reason-Act' methode.

Via het Outreachfonds van Sectorplan 1 Bèta en Techniek worden diverse informaticaonderwijsprojecten gefinancierd.

bij vele lokale activiteiten, vaak verbonden via de nationale bètasteunpunten. Van de middelen uit Sectorplan 1 wordt door de deelnemende instellingen jaarlijks 700K Euro beschikbaar gesteld in een gemeenschappelijk fonds voor outreachprojecten op het gebied van wis-, natuur-, scheikunde en informatica. Dit fonds wordt beheerd door de vicedecanen onderwijs die jaarlijks middelen aan sterke projectvoorstellen toekennen. Twee voorbeelden van succesvolle outreachprojecten binnen de Informatica, die met sectorplanmiddelen gestimuleerd worden, zijn **Hedy** (stap voor stap programmeren in Python voor kinderen) en de activiteiten van **Informatica Olympiade**.

DE SECTOR INFORMATICA: ORGANISATIE, KWALITEIT EN OMVANG

LANDELIJKE ORGANISATIE

De Nederlandse universitaire Informatica heeft een lange traditie van nationale samenwerking. De informatici zijn georganiseerd in het ICT research platform Nederland (IPN). De leden van IPN, weergegeven in het bovenste deel van Figuur 2, zijn de algemene universiteiten en de universiteiten van de 4TU met een aanzienlijke informaticaonderzoek- en/of onderwijsfocus, en het Centrum voor Wiskunde en Informatica (CWI). Een aanzienlijk deel van de staf van het CWI heeft ook een positie als UD, UHD of hoogleraar in de informatica bij een universiteit en vormt daarmee een belangrijke verbindende rol tussen de instellingen. Middels zijn nieuwe strategie¹² zet het CWI nadrukkelijk in op een faciliterende rol bij de intensivering van de nationale samenwerking binnen de sector Informatica in de komende jaren.

Binnen IPN zijn er intensieve samenwerkingen op specifieke deelgebieden in de ‘Special Interest Groups (SIGs)’: **VERSEN** (Vereniging voor Software Engineering), SIG-Cyber Security/**ACCSS**, SIG-Artificial Intelligence (**SIGAI**)¹³, Data Science Platform Nederland (**DSPN**), en SIG-Future Computer Systems and Networking (**FCSN**). De drie landelijke informaticaonderzoeksscholen (**ASCI**, **IPA**, **SIKS**) werken nauw samen, en ook zijn er lokale en interlokale initiatieven voor onderzoek- en onderwijsafstemming (zoals **NIRICT** tussen de vier technische universiteiten, en Amsterdam Data Science (**ADS**) in het Amsterdamse cluster). Uit **NIRICT** en **COMMIT** is het IPN netwerk ‘**ICT Next Generation**’ ontstaan, een landelijke community van jonge ICT onderzoekers. Goede banden zijn er ook met **diverse andere bijzondere leden**, waaronder TNO, SURF en Platform Wiskunde Nederland (PWN). Het jaarlijkse nationale **ICT.Open congres** dat ten doel heeft wetenschappers uit alle ICT-onderzoekdisciplines en industrieën samen te brengen om elkaar te ontmoeten, te leren en ideeën uit te wisselen, wordt gezamenlijk georganiseerd door IPN, het HBO-ICT lectorennetwerk **PRIO**, en NWO.

Naast de levendige community en intensieve sectorale samenwerking wordt veelvuldig samengewerkt met andere universitaire disciplines en domeinen, met name in de cross-disciplines en in de contextuele toepassing en doorontwikkeling van digitale technologie. Dit komt onder andere tot uitdrukking in de samenwerking in diverse sectoroverstijgende opleidingen, bijvoorbeeld op het gebied van Data Science en Humane AI en in opleidingen als Bio-informatica en Robotica. In de huidige sectorplanaanvragen van alle domeinen valt op dat deze digitale wetenschappelijke methodieken steeds verder geïntegreerd raken in het onderzoek en onderwijs in alle disciplines.

¹² CWI Strategic Plan 2022-2027

¹³ De SIG-AI is het Nederlandse deel van de Belgisch-Nederlandse Vereniging voor Kunstmatige Intelligentie (BNVKI)

FIGUUR 2. LANDELIJKE ORGANISATIE VAN DE SECTOR INFORMATICA



Legenda: In het bovenste blok in de figuur staan de universiteiten zoals zij verenigd zijn in IPN, inclusief de special interest groups, onderzoeksscholen, en samenwerkingsverbanden. Daaronder zijn enkele belangrijke Nederlandse kennisparkers benoemd (niet uitputtend). In het onderste blok is de organisatie van de Top-sector ICT weergegeven. Ook in de vijf initiatieven van de topsector zijn de universiteiten goed vertegenwoordigd via boegbeelden, onderzoekers, coördinatoren en programmamanagers.

KWALITEIT EN OMVANG VAN ONS ONDERZOEK

In het recente onderzoeksvisitatierapport Informatica over de periode van 2015 tot en met 2020 (publicatie mei 2022), benoemt de visitatiecommissie o.a. de consistent hoge kwaliteit van het Nederlandse informaticaonderzoeksveld (zie Kader III)^{14,15}.

Vertaald uit: Onderzoeksvisitatierapport Informatica 2015-2020

Het Nederlandse informaticaonderzoek (..) staat er goed voor, met veel excellente voorbeelden van onderzoek output en de aanwezigheid van een groot aantal internationaal vooraanstaande wetenschappers. Informatica in Nederland heeft internationaal gezien altijd een sterke positie gehad met kwalitatief hoogwaardig onderzoek en veel impact. De commissie is verheugd dat dit ook in de periode van deze visitatie nog steeds het geval is.

Informatica is zeer goed vertegenwoordigd in de landelijke Zwaartekracht-programma's en in de routes en subsidies van de Nationale Wetenschaps Agenda (NWA). Met het inmiddels landelijke netwerk van ICAI labs, na initiatie in 2018 door de universiteiten in Amsterdam, is rechtstreekse financiering van onderzoek vanuit de private sector sterk toegenomen.

De organisatie van het universitaire Informaticaveld is sterk verbeterd met een centrale rol voor IPN en haar Special Interest Groups en coördinerende rol in het sectorplan.

KADER III

Het Nederlandse marktaandeel¹⁶ in de internationale wetenschappelijke informatica-output, meetbaar via de parameters field-weighted citation impact score (FWCI) en output score (OSI), is echter al jaren kleiner aan het worden. De Nederlandse citatie impact score is in de periode 2017-2020 gemiddeld ($0,9 < \text{FWCI} < 1,1$), en daarmee stabiel ten opzichte van de vorige periode. Op specifieke deelgebieden, waaronder AI, is het Nederlandse onderzoek toonaangevend ($\text{FWCI} = 2,08$ over 2013-2018, #4 wereldwijd)¹⁷. De hoeveelheid publicaties in internationale peer-reviewed journals zet echter de dalende trend uit het eerste sectorbeeld door en ligt beneden het internationale gemiddelde ($\text{OSI score} < 0,8$).

Dit heeft drie belangrijke oorzaken. Een eerste oorzaak ligt in de beperkte Nederlandse investeringen in wetenschappelijk informaticaonderzoek ten opzichte van de internationale concurrentie. Ook in eigen land blijft de relatieve toekenning van subsidies voor fundamenteel informaticaonderzoek uit de nationale subsidiaire onderzoeksfondsen (tweede geldstroom) achter ten opzichte van andere bètadisciplines. De tussentijdse rapportage over sectorplan

14 Onderzoeksvisitatierapport Informatica 2015-2020, De Onderzoekerij (2022, zie bijlage 6 voor samenvatting op hoofdlijnen, volledige rapport op aanvraag te leveren)

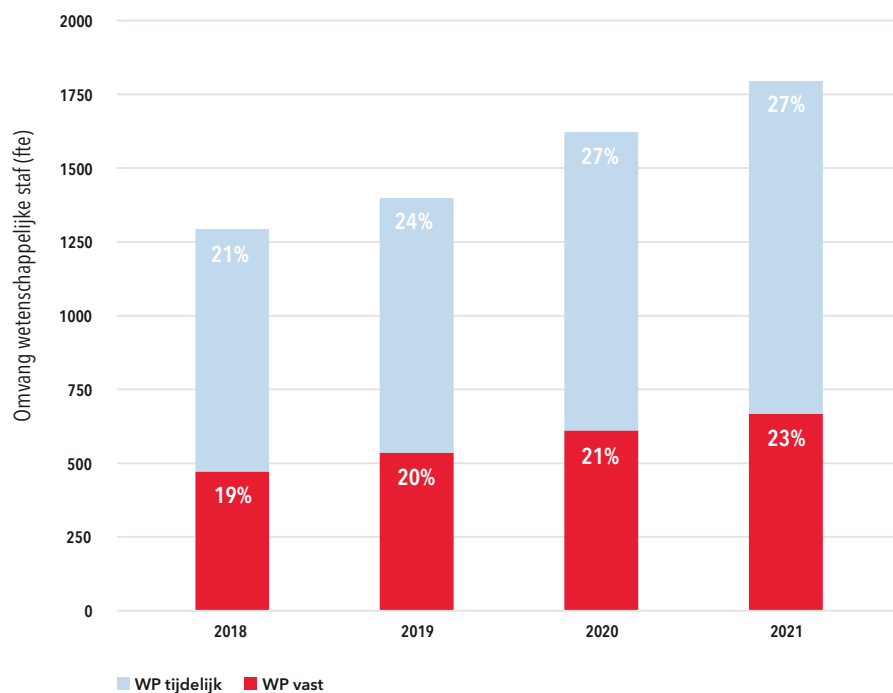
15 Zie bijlage 7 voor een lijst met kwaliteitsindicatoren voor de sector, waaronder persoonlijke grants en zwaartekrachtprogramma's.

16 Prestatieprofiel van het Nederlandse onderzoeksbestel | Rathenau Instituut

17 Onderzoek naar kunstmatige intelligentie in Nederland | Rathenau Instituut

1 laat zien dat de sector Natuurkunde, die in omvang (landelijke vaste staf) vergelijkbaar is met de sector Informatica, jaarlijks consistent 3,5 keer zoveel middelen per fte toegekend krijgt via de tweede geldstroom.

Een tweede deelloorzaak ligt in de focus op toepassingsgericht informaticaonderzoek. Veel universiteiten weten de eerste geldstroom te verdubbelen via tweede geldstroom, en via de internationale subsidiaire onderzoeksfondsen en publiek-private samenwerking (derde geldstroom). In de beleidsagenda's achter deze additionele geldstromen is echter slechts beperkt aandacht voor funderende wetenschap. Het merendeel van het budget is daarmee bestemd voor doorontwikkeling, innovatie en toepassing.



FIGUUR 3. ONTWIKKELING IN WETENSCHAPPELIJKE STAF TUSSEN 2018 EN 2022

Legenda: WP = wetenschappelijk personeel. Vast WP bestaat uit hoogleraren, universitair (hoofd)docenten, tenure trackers, docenten en overig WP in vaste dienst. Tijdelijk WP bestaat uit postdocs, promovendi, docenten en overig WP in tijdelijke dienst. Het percentage in de balken vertegenwoordigt het percentage vrouwen in de betreffende categorie.

Vanuit een ambitie om ruimte te creëren voor onderzoekers om tot nieuwe doorbraken te komen binnen een breed spectrum aan onderzoeksthema's zijn de middelen uit het Sectorplan 1 ingezet om het funderende informaticaonderzoek een impuls te geven. Deze structurele middelen hebben inmiddels geleid tot een toename met tenminste 64 fte van de vaste wetenschappelijke staf in de Informatica-afdelingen van de participerende universiteiten. Daarbovenop hebben de instellingen 90 fte aan vaste posities in de focusgebieden gecreëerd vanuit de eerste geldstroom. Echter, door toenemende studentenaantallen in diezelfde periode is de bedoelde ruimte niet ontstaan. De blijvend hoge onderwijsdruk is daarmee de derde deelloorzaak die debet is aan een geringer aantal ingediende aanvragen voor funderende onderzoeksubsidies vanuit de sector dan mogelijk zou zijn bij een betere balans in de onderzoek- en onderwijsstaakverdeling van het wetenschappelijk personeel.

KWALITEIT EN OMVANG VAN ONS ONDERWIJS

De ontwikkelingen in digitale technologie en digitalisering volgen elkaar in rap tempo op. Vanuit het werkveld is hierdoor met name de vraag naar kennis en vaardigheden op het gebied van snel evoluerende digitale technologieën op het gebied van AI, IoT, big data analytics en cybersecurity sterk toegenomen¹⁸. Dit vertaalt zich naar een landelijk onderwijsaanbod dat versneld nieuwe ontwikkelingen in het curriculum inbrengt en daardoor ook sterk in beweging is. Naast het reeds bestaande aanbod zijn sinds de start van Sectorplan 1 enkele opleidingen uitgefaseerd, zijn nieuwe specialisaties en tracks geïntroduceerd in bestaande opleidingen, en zijn (of worden binnenkort) diverse nieuwe opleidingen gestart¹⁹. In de **bachelorfase** concentreert zich het aanbod met name op de brede vormende studies (Technische) Informatica, Informatiekunde, Kunstmatige Intelligentie, en Data Science. Studenten kunnen daarbij kiezen voor verschillende specialisaties en minors, het aanbod daarvan verschilt per universiteit en is afhankelijk van de lokale wetenschappelijke focus. Het opleidingsaanbod in de **masterfase** is uitgebreider en vanwege de onderzoekmatige opzet van het tweede jaar van deze researchmasters stevig ingebed in de onderzoekfocus van de instelling. Binnen het aanbod van de brede informaticaopleidingen biedt bijna iedere instelling specialisaties/tracks aan op het gebied van Software Engineering, Data Science, AI, Algoritmiek en/of Cyber Security.

STUDENTEN: INSTROOM, AANTALLEN, DIPLOMA'S EN GENDER

Het totale aantal studenten aan de universiteiten is in de periode van 2018 tot en met 2021 met 18% toegenomen²⁰. Het is de verwachting van het ministerie van OCW dat deze groei ook in de komende sectorplan periode zal doorzetten²¹. Figuur 4a laat zien dat in dezelfde periode de gemiddelde studenteninstroom in de informaticaopleidingen met 36% toegenomen is, terwijl het totaal aantal informaticastudenten steeg met 43%. Voor de informaticaopleidingen ligt de groei dus ver boven het landelijk gemiddelde met als gevolg dat de groeiambitie tot 2024, zoals geformuleerd in Sectorplan 1, in collegejaar '21-'22 al ruimschoots werd behaald. Zowel de bachelor als de master groeit, waarbij de master iets sneller uitbreidt, onder meer door een toename in internationale instroom. De aanhoudende groei vertaalt zich ook naar meer alumni: in collegejaar '21-'22 studeerden 61% meer studenten af dan in '18-'19.

STUDENT/STAF RATIO'S

De student/staf ratio van een opleiding wordt als kwaliteitsindicator meegenomen in de cyclus van onderwijsvisitatierapportages. Daarnaast is het een belangrijke indicator voor onderwijsgerelateerde werkdruk bij de wetenschappelijke staf. De landelijke benchmark, de gemiddelde student/staf ratio over alle universiteiten en disciplines in de periode waarover gerapporteerd wordt, lag in de periode van 2018-2021 rond de 19,7²². Figuur 4c laat zien dat voor de bachelor- en masteropleidingen die in dit sectorplan meegenomen zijn dit getal in dezelfde periode op 31,3 lag. Hierbij valt de aanzienlijke spreiding in de ratio's van de instellingen op. Wil de sector Informatica met investeringen in personeel de student/staf-ratio naar het niveau van de landelijke benchmark brengen, dan zal de sector (bij gelijkblij-

18 ICT arbeidsmarktonderzoek met topsectoren 2019 door Berenschot

19 Zie bijlage 5 voor de lijst met opleidingen.

20 UNL: studentengroei en student/staf ratio's 2012-2021

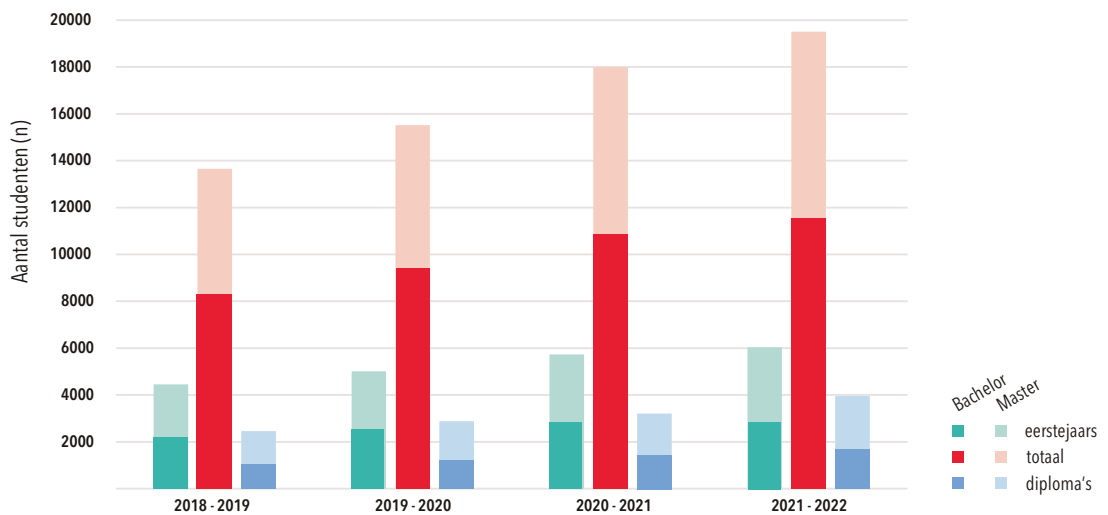
21 OCW in cijfers: Prognose aantal studenten wo

22 UNL: studentengroei en student/staf ratio's 2012-2021

vende studentenaantallen) een groei met 377 fte vast wetenschappelijk personeel (naar 1000 fte landelijk) moeten realiseren. Om de student/staf ratio en de onderwijsdruk hanterbaar te houden is bij een aantal bacheloropleidingen een numerus fixus ingesteld. Het Sectorplan Onderwijs Bètatechniek (2020)²³ van de 4TU federatie, met daarin speciale aandacht voor de informaticaopleidingen, benoemt ook de grote opgave waar de opleidingen voor staan en zet met gerichte acties o.a. in op het vergroten van de capaciteit. Pas als de student/staf ratio naar een acceptabel niveau gebracht is, kunnen capaciteitsgrenzen opgehoogd worden voor sommige van de huidige numeri fixi.

ONDERWIJSKENGETALLEN IN DE PERIODE VAN 2018 TOT 2022

FIGUUR 4A. ONTWIKKELING IN STUDENTENAANTALLEN EN DIPLOMA'S TUSSEN 2018 EN 2022

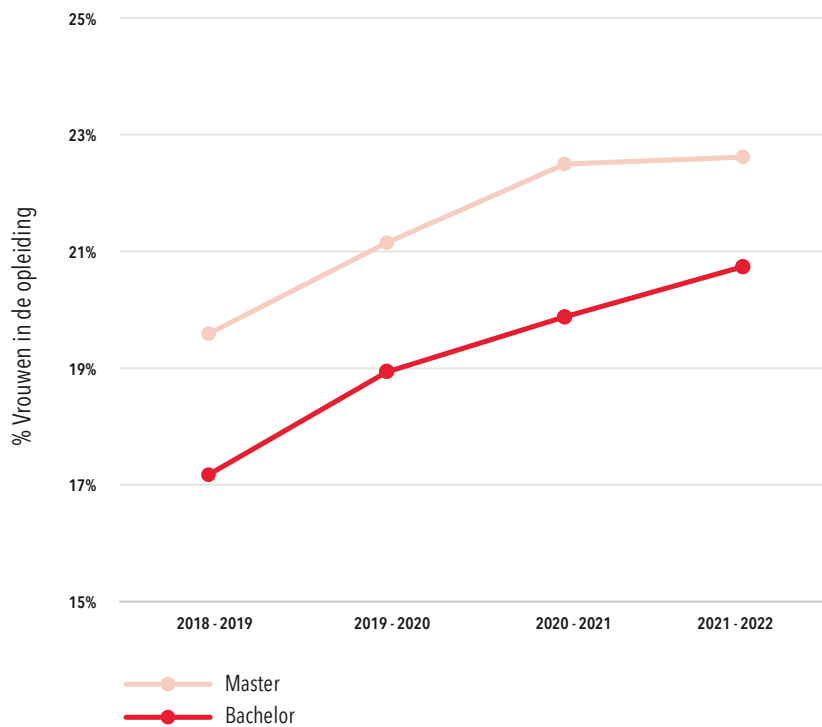


Legenda: De hoogte van de staafdiagrammen is de optelsom van aantallen in de bachelor- én master. Data zijn afkomstig van DUO, peildatum 1 oktober van het gegeven academische jaar. De opleidingen die zijn meegenomen staan weergegeven in bijlagen 5 en 6. De gegevens van de opleidingen van de OU zijn hier niet meegenomen.

Het aantal vrouwen in een informaticaopleiding, bachelor en master, is langzaam aan het toenemen (Figuur 4b) maar nog ver verwijderd van het door de sector eigen gestelde doel in Sectorplan 1 van 27% voor 2024.

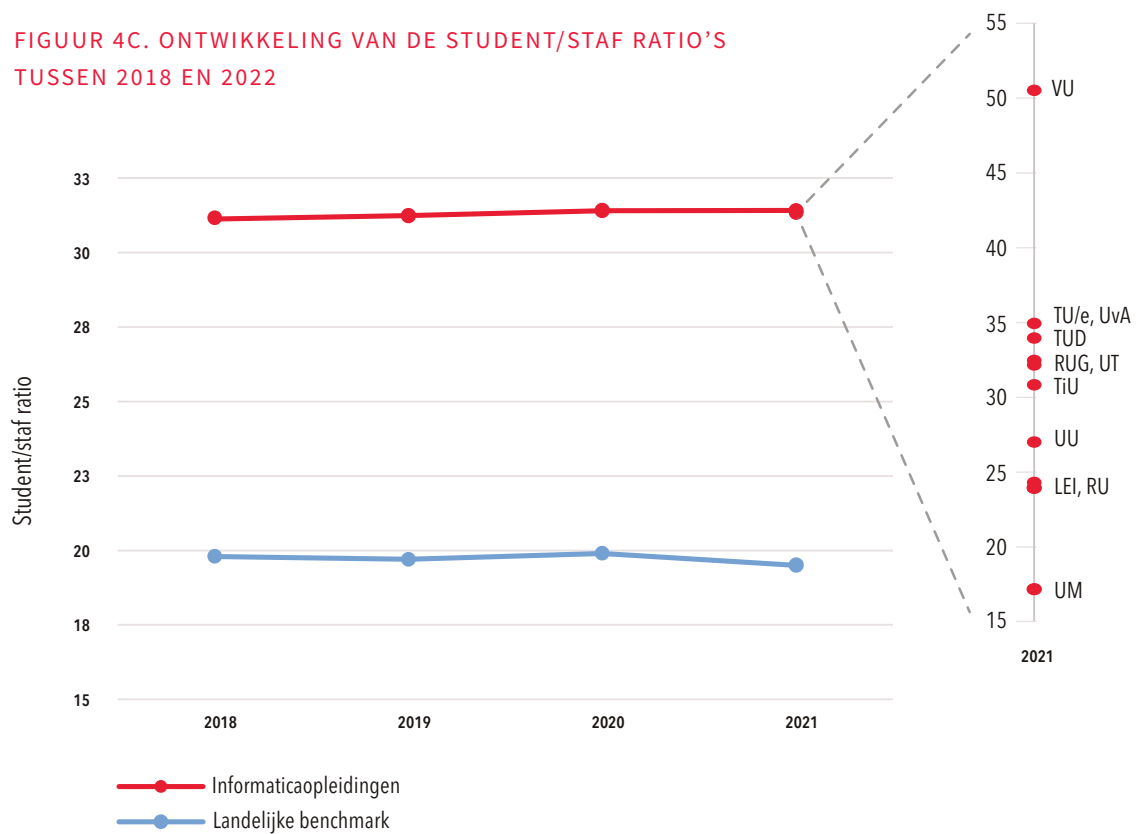
²³ Sectorplan bètatechniek (4tu.nl)

FIGUUR 4B. STUDENTENPOPULATIE: ONTWIKKELING IN GENDER TUSSEN 2018 EN 2022



Legenda: Percentage vrouwen van het totaal aantal studenten in de bachelor- of masteropleiding. Data zijn afkomstig van DUO, peildatum 1 oktober van het gegeven academische jaar.

FIGUUR 4C. ONTWIKKELING VAN DE STUDENT/STAF RATIO'S TUSSEN 2018 EN 2022



Legenda: student/staf ratio's per kalenderjaar berekend als totaal aantal studenten op de peildatum 1 oktober, over het aanwezige vaste wetenschappelijke personeel inclusief docenten (peildatum 31 december). Voor 2021 is de spreiding inzichtelijk gemaakt.

STUDENTTEVREDENHEID, AANSLUITING OP DE ARBEIDSMARKT EN WERKGEVERSONDERZOEK

De studenttevredenheid, zoals gemeten in de meest recente **Nationale Studentenenquête** (NSE, 2022), is zowel in de bachelor als in de master bovengemiddeld (beide scoren gemiddeld 3,8 met een spreiding van resp. 3,4-4,1 en 3,5-4,1 op een schaal van 5). Ieder jaar ontstaan veel meer nieuwe vacatures dan dat er gediplomeerde hoogopgeleide ICT-specialisten op de arbeidsmarkt bijkomen, het arbeidsperspectief van alumni is dan ook uitstekend; 92%-96% van de informatica-alumni (afhankelijk van afstudeerrichting) heeft bij afstuderen of kort daarop een baan binnen de sector. Onze alumni schetsen in de **Nationale Alumni Enquête** (NAE, 2019) een gunstig beeld over de aansluiting van de universitaire informaticaopleidingen op de arbeidsmarkt. Echter, in de opeenvolgende arbeidsmarkt-ICT onderzoeken van Berenschot (2019) en CentERdata (2020, 2021) in opdracht van **stichting CA-ICT** geven werkgevers aan dat Nederland niet alleen méér pure informatici nodig heeft, maar dat deze specialisten meer dan voorheen ook over de vaardigheden moeten beschikken waarmee ze de vertaalslag kunnen maken naar de behoefte van de mens, markt en maatschappij. Daarin ligt volgens de werkgevers nog een opdracht voor de universiteiten.

ONZE ANDERE ONDERWIJSVORMEN

DE LERARENOPLEIDING INFORMATICA

Het aantal middelbare scholen waar informatica als eindexamenvak aangeboden wordt is dalende. Een belangrijke reden hiervoor is een tekort aan docenten. De status van informatica als schoolexamenvak, een vak dat op minder dan de helft van de scholen wordt gegeven, en op havo/vwo slechts door 12% van de leerlingen als examenvak gevolgd wordt²⁴, maakt het lastig professionals aan te trekken die de eerstegraads docentenopleiding Informatica willen doen. De Bètadecanen trekken gezamenlijk op in het stimuleren van docenteninstroom in de eerstegraadsopleidingen voor de vier tekortvakken wis-, natuur-, scheikunde en informatica.

Allereerst via het zij-instroomprogramma **Bèta4all**, dat gefinancierd wordt door de Bètadecanen, en bestuurd wordt door hun vicedecanen onderwijs in samenwerking met de onderwijsdirecteuren van de universitaire lerarenopleidingen (ULO's). In het informaticadeel, genaamd Inf4all, worden acht vakken verzorgd waarmee toekomstige instromers van de lerarenopleiding Informatica hun deficiënties kunnen wegwerken. In 2020-21 werd dit gedaan door 33 unieke deelnemers. Daarnaast is de Bètalerarenkamer ingericht, met daarin invloedrijke experts uit zowel de vakverenigingen (waaronder IPN), de ULO's en het voortgezet onderwijs (VO). Via het project **Co-Teach** worden onbevoegde gastdocenten met ICT-kennis gekoppeld aan vakdocenten. Zij verzorgen gezamenlijk het vak Informatica. Met ingang van het academisch jaar 2022-23 nemen 12 middelbare scholen deel aan Co-Teach, geconcentreerd in de regio's Utrecht en Twente.

ONDERWIJS VOOR PROFESSIONALS

De ontwikkelingen in de ICT gaan zo snel dat kennis en kwalificaties snel verouderd zijn. Daarnaast is er een steeds grotere behoefte vanuit het werkveld om in te zetten op het verstevigen van de algemene digitale kennis en vaardigheden van niet-ICT'ers. Professionals zullen zich daarom steeds vaker moeten om- of bijscholen om relevant te blijven op de arbeidsmarkt. De universiteiten nemen hierin samen met werkgevers hun verantwoordelijkheid en verzorgen een steeds breder wordend aanbod voor professionals. Dit aanbod varieert van korte en langere trainingen en leergangen, tot volledige onderwijsprogramma's zoals executive masterprogramma's en Engineering Doctorate programma's (EngD, specifiek voor de 4TU).

NOOIT MEER TREINVERTRAGINGEN?

Het Nederlandse spoor behoort tot de drukst bereden spoornetwerken ter wereld. Binnen diverse onderzoeksprojecten kijken we hoe we de betrouwbaarheid van het spoor kunnen verbeteren. Zo ontwikkelen we methoden waarmee we storingen in de infrastructuur kunnen voorspellen op basis van data-analyses, dit heet *predictive maintenance*. Via slimme sensoren kunnen we de conditie van bijvoorbeeld spoorstaven monitoren. Vervolgens gebruiken we algoritmen uit de AI om te voorspellen waar scheurvorming kan optreden. Hierdoor kunnen we onderhoud beter efficiënter plannen. We kunnen dan uitrekenen wat de beste termijn is om spoorstaven te slijpen, of te vervangen. Ander onderzoek richt zich op de EULYNX-standaard. Dit is een speciale modelleertaal om het gedrag van spoorelementen, zoals seinen en wissels, te beschrijven. Informatici ontwerpen methoden om te checken of deze EULYNX-modellen correct zijn: reageert een wissel correct op alle omgevingssignalen? Kunnen er zgn. deadlocks optreden, waarin een sein 'hangt' en helemaal niet meer reageert? Door deze modellen grondig te checken, zorgen we dat spoorelementen geen fouten bevatten.



DE SECTORPLANDOELLEN: HET CREËREN VAN RUST EN RUIMTE

Ondanks de effectieve besteding van de middelen uit het lopende sectorplan (Sectorplan 1) is de urgentie op enkele van de genoemde thema's in het kader hieronder verder toegenomen gedurende de huidige sectorplanperiode. Deze belangrijkste kansen en knelpunten in de verwezenlijking van de sectorplandoelen²⁵ werden grotendeels al eerder gesignaleerd in o.a. Sectorplan 1 en het bijbehorende tussenevaluatierapport, de IPN-visie, het onderzoeksvisitatierapport Informatica (periode 2015-2020), en verscheidene andere (maatschappelijke en beleids-) rapporten.

De nieuwe sectorplanmiddelen zijn een tweede stap in de goede richting maar ook deze middelen zullen naar onze verwachting niet voldoende zijn om de benodigde rust en ruimte in de sector te brengen. Hieronder lichten we de kansen en knelpunten toe waar de sector voor staat.

KANSEN EN KNELPUNTEN

Kansen en knelpunten zijn twee zijdes van dezelfde medaille; de combinatie met diverse andere variabelen in het speelveld, en de daaruit volgende mogelijke handelingsperspectieven (of gebrek daaraan) bepaalt in de praktijk doorgaans of een kans benut kan worden of dat de kans in feite een knelpunt is. De belangrijkste uitdagingen voor de universiteiten naar aanleiding van de kansen en knelpunten uit Kader IV worden hieronder nader toegelicht. Kader V vat puntsgewijs samen hoe de nieuwe sectorplanmiddelen ingezet kunnen worden om deze uitdagingen het hoofd te bieden.

Kansen

1. Zeer snelle ontwikkelingen in het vakgebied
2. Veel maatschappelijke aandacht voor het belang van digitalisering en digitale technologie
3. Financiering van toegepast onderzoek
4. Rol van informatica als methodologie in andere disciplines
5. Toenemende studentenaantallen
6. Aanboren nieuwe doelgroepen

Knelpunten

7. Zeer krappe arbeidsmarkt
8. Werkdruk door oplopende student/staf ratio's
9. Gebrek diversiteit in studentenpopulatie en staf
10. Beperkte financiering fundamenteel onderzoek
11. Beperkte aandacht voor Informatica in het primair en voortgezet onderwijs
12. Absorptievermogen bij te snelle groei in staf

KADER IV

DE AANHOUDENDE MISMATCH TUSSEN VRAAG EN AANBOD

Opleiden: een kwalitatieve én kwantitatieve uitdaging (K1, 2, 5, 7, 8). De verregaande transitie naar een digitale samenleving is een constante drijfveer voor ontwikkelingen in het informaticaveld, zowel in de funderende principes als in de toepassing. De ontwikkelingen gaan zo snel dat kennis snel verouderd is, en dat aanpassing van het onderwijscurriculum een continu punt van aandacht is. De verschuiving naar een digitalere samenleving gaat daarnaast gepaard met een steeds grotere behoefte aan hoogopgeleide ICT-specialisten. Om aan de arbeidsmarktvraag tussen nu en 2030 te kunnen voldoen zullen de universiteiten (en hogescholen) aanzienlijk meer informatici moeten opleiden. In recente jaren is de instroom in de universitaire informaticaopleidingen aanzienlijk toegenomen (Figuur 4a). De verwachting is dat deze toename voorlopig zal doorzetten maar dat dit in de komende jaren niet voldoende zal blijken om in de maatschappelijke behoefte te voorzien. Naast toegenomen werkdruk in de eigen onderwijsprogramma's van het reguliere bachelor en masteronderwijs, wordt ook steeds vaker een beroep gedaan op de staf van informaticagroepen/instituten om cursussen te verzorgen als onderdeel van andere opleidingen (service onderwijs) en om onderwijs voor professionals te verzorgen. Zowel private als publieke partijen doen regelmatig een beroep op universiteiten om tot nieuwe schaalbare onderwijsvormen te komen voor het bijscholen van hun professionals.

De uitdagingen voor de opleidingen zijn derhalve complex en liggen in een combinatie van het aanbieden van een relevant en kwalitatief hoogwaardig curriculum en het tegelijkertijd (gefaseerd) opschalen en verzorgen ervan zonder dat dit onacceptabele gevolgen heeft op de werkdruk, én het aantrekken en behouden van (voldoende) onderzoekers en docenten voor het realiseren van het onderwijsaanbod (in de eigen opleidingen en daarbuiten). Dit laatste is een forse uitdaging op de zeer krappe arbeidsmarkt waar getalenteerde informatici schaars zijn terwijl er op de gehele arbeidsmarkt veel vraag naar is.

Een uitdaging in groei en balans vinden (K5, 7, 8, 12). De studentenaantallen en de wetenschappelijke staf in de Informatica-instituten zijn met gelijke tred toegenomen in de eerste drie jaar van Sectorplan 1. De investeringen hebben daarom nog niet geleid tot een reductie van de werkdruk en/of de gewenste verbeterde balans tussen onderzoek en onderwijstaken. Belangrijke punten van aandacht zijn het absorberend vermogen van de snelst gegroeide instituten, en het behoud van aangetrokken talent. **Additionele investeringen vanuit het Sectorplan 2022/23-2028/2029 zijn daarom essentieel: enerzijds voor het verder uitbreiden van de vaste staf met docenten en onderzoekers, en anderzijds voor het aantrekken van hoogwaardig ondersteunend personeel.**

Een diversiteitsuitdaging (K6, 9, 11). Digitalisering vormt de samenleving, het is daarom van belang dat de mensen die nieuwe digitale technologieën ontwikkelen representatief zijn voor een breed spectrum aan perspectieven en sociale waarden. Dat betekent dat we mensen met verschillende achtergronden - wat betreft gender, nationaliteit, socio-economische achtergrond - enthousiast moeten maken voor een informatica-opleiding. De uitdaging voor de sector zit in het bereiken van deze diverse doelgroepen door middel van outreach, inclusief onderwijs en rolmodellen. Via outreach-activiteiten naar leerlingen in het primair en voortgezet onderwijs wordt een diverse doelgroep bereikt, maar deze korte interventies vertalen zich nog niet naar een sterke toename van de diversiteit in de instroom in de bacheloropleidingen. In het lopende sectorplan hebben de universiteiten zich met succes ingezet op het werven van vrouwelijke onderzoekers. Deze strategie zal ook in komende jaren worden voortgezet. **Ook met de nieuwe sectorplanmiddelen committeren de universiteiten zich**

aan een wervingsstrategie waarbij op 50% van de posities een vrouw wordt aangenomen. Het is echter nog niet genoeg, en diversiteit is meer dan gender.

Een belangrijk knelpunt buiten de directe invloedssfeer van de universiteiten is het gegeven dat ‘Digitale Geletterdheid’ als thema en informatica als vak nog immer matig geïntegreerd zijn in het primair en voortgezet onderwijs. Al in 2012 adviseerde de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen (KNAW) het ministerie van OCW om Informatica op te nemen als vak binnen het centraal eindexamen²⁶. Ook de ICT-branche zelf (Ag Connect en VNO-NCW) drong al in 2017 sterk aan op ICT als vak in het basis en middelbaar onderwijs²⁷. In 2019 heeft het primair en voorbereidend onderwijsveld, als onderdeel van curriculum.nu, zelf diverse aanbevelingen en voorstellen voor de uitwerking van het thema in het curriculum (po, vo en mbo) gedaan²⁸. Een recent ingezonden opiniestuk van een leerling in het Parool²⁹ onderschrijft het belang en de urgentie van het leren van vaardigheden (waaronder computertalen) voor het ‘automatiseren en oplossen van alledaagse problemen met computers’, die ook bij middelbare scholieren gevoeld wordt. Helaas hebben de diverse voorstellen en signalen, nog steeds niet geleid tot aanpassingen in het curriculum.

HET VINDEN VAN DE BALANS TUSSEN FUNDEREND EN TOEPASSINGSGERICHT ONDERZOEK

Een financiële uitdaging (K3, 10). In haar visitatierapport benoemt de onderzoeksvisitatie commissie de onevenredige scheve verhouding in Nederland in de financieringsmogelijkheden voor onderzoek in het voordeel van toepassingsgericht en multidisciplinair onderzoek. Dit wordt ook in de visie van IPN signaleerd als een groot knelpunt en gemiste kans aangezien juist het door nieuwsgierigheidgedreven onderzoek, ook wel *blue sky research* genoemd, heeft geleid tot de ontwikkeling van baanbrekende technologieën.

Het belang van de ICT-sector is groot, en in de orde van 6% van de totale arbeidsmarkt (met een voorspelde groei naar 10% in 2030)³⁰. Gezien het maatschappelijk belang van digitale technologie en de snelheid van ontwikkelingen in de ICT is een passend aandeel in het Nederlandse onderzoeksbudget op zijn minst een vergelijkbaar percentage. **Nieuwe sectorplanniddelen zullen door de universiteiten ingezet worden voor het verder verstevigen van het fundament en het uitzetten van de langetermijnvisie op informaticaonderzoek in Nederland (en Europa).**

Een maatschappelijke en (mono, inter en trans)disciplinaire uitdaging (K1-4, 10). De pull vanuit de maatschappij en andere wetenschappelijke disciplines aan informatici naar meer toepassingsgericht onderzoek is aanzienlijk. Digitalisering is benoemd als één van de drie grote transitieën waar het missie-gedreven innovatiebeleid van de regering zich op richt (regeerakkoord, p29-32). Informatica en haar toepassingen worden daarnaast ook steeds vaker én in een steeds breder palet aan wetenschappelijke disciplines bestudeerd, ingezet als methodologie én/of context-gericht doorontwikkeld in het onderzoek. In de online UNL-omgeving ‘[Digitale Samenleving: van Ambitie naar Aanpak](#)’ geven de universiteiten aan dat

26 Lenstra, J. K., Barthel, P., Brock, E. O. de., Jong, F. M. G. de., Lagendijk, R. L., Oortmerssen, G. v., et al. (2012). Digitale geletterdheid in het voortgezet onderwijs: Vaardigheden en attitudes voor de 21ste eeuw. Amsterdam: KNAW.

27 Onderzoek AG Connect: ICT moet verplicht vak worden - AG Connect

28 Uitwerking Digitale geletterdheid - Curriculum.nu

29 Lena van Kruisdijk (14 september 2022) *Opinie: ‘Leer ons programmeertalen Python en Java, in plaats van Frans en Duits’* (parool.nl)

30 Zie bijlage 2 voor een uitgebreide arbeidsmarktanalyse

ze zich als proeftuin voor digitale innovaties willen profileren. Daarbij wordt expliciet gepleit voor een aanpak vanuit een breed spectrum van disciplines, en in nauwe samenwerking met de private en publieke sector.

De brede aandacht voor de toepassing en innovatie met digitale technologie geeft een waardevolle impuls aan de sector maar er schuilt ook een gevaar in dat eerder in 2010 treffend is verwoord door de huidige minister van OCW. In één van zijn columns in het NRC³¹ noemde Robbert Dijkgraaf Informatica ‘bij uitstek een wetenschap waarbij de toepassing zó vanzelfsprekend is dat er vaak vergeten wordt dat het ook om *wetenschap* gaat’. Om een blijvende bijdrage te kunnen leveren, en om ook vanuit een interdisciplinaire en toegepaste setting innovaties aan te kunnen dragen, zal de sector Informatica zelf het eigen nieuwsgierigheids-gedreven onderzoek moeten aanjagen en borgen. De ultieme uitdaging ligt daarbij in het dusdanig combineren van de verschillende vormen van onderzoek op Pasteur’s continuüm (van fundamenteel tot toegepast) dat de perspectieven convergeren waardoor nieuwe inzichten en innovaties niet worden belemmerd, maar door de samenwerking juist versneld ontstaan.

Onze ambities samengevat

De universiteiten willen de nieuwe sectorplanmiddelen inzetten op de verdere uitbreiding van de vaste staf met docenten, onderzoekers en hoogwaardige ondersteuning met als doel:

1. Meer onderwijscapaciteit om aan de maatschappelijke opleidingsbehoefte te kunnen voldoen en om een relevant en hoogwaardig opleidingsaanbod te kunnen realiseren voor de toenemende studentenaantallen enerzijds en professionals anderzijds;
2. Meer onderzoekcapaciteit waardoor we het onderzoeks- en ontwikkelfundament onder de maatschappelijke en wetenschappelijke digitale transitie blijvend kunnen garanderen. De onderzoekscapaciteit zal ten goede komen aan zowel het disciplinaire onderzoek als een bijdrage leveren aan de cross- en transdisciplinaire uitdagingen;
3. Meer diversiteit in de staf zodat de sector Informatica een betere afspiegeling wordt van de maatschappij. Grotere diversiteit in de sector zal naar verwachting bijdragen aan een diversere instroom in de opleidingen en daarmee op termijn ook aan een diversere ICT beroepsbevolking. Niet alleen is een grotere diversiteit belangrijk voor het benutten van het maatschappelijk potentieel, diversiteit is essentieel in het voorkomen van bias en misrepresentatie van verschillende bevolkingsgroepen in de code achter ICT-producten en systemen;
4. Behoud van talent door voldoende ondersteuning, diverse en inclusieve afdelingen, en een takenpakket met daarin voldoende ruimte voor zowel onderwijs als onderzoek.

HET VERWEZENLIJKEN VAN ONZE AMBITIES

Bovenstaande ambities binnen het onderzoek en onderwijs verwezenlijken we door gericht in te zetten op versterking van het universitaire landschap in specifieke focusgebieden. Voor Sectorplan 1 is de volgende indeling in zeven focusgebieden gemaakt die nog steeds relevant is:

1. Data modelleren en analyseren
2. Machinaal leren
3. Machinaal redeneren en interactie
4. Algoritmie
5. Software
6. Security en privacy
7. Genetwerkte computer- en embedded systemen

De focusgebieden staan nader beschreven in bijlage 3. Inhoudelijk zijn ze voor dit aangescherpte sectorbeeld bijgesteld ten opzichte van de beschrijvingen in Sectorplan 1 zodat recente ontwikkelingen zichtbaar zijn. Daarbij maken we hun inbedding en impact zichtbaar in de context van de grote wetenschappelijke vraagstukken en maatschappelijke thema's. De focusgebieden omvatten (in naam of inhoud) de vijf sleuteltechnologieën die door de Topsector ICT gekozen zijn als nationale speerpunten: AI, Big Data, Blockchain, Cybersecurity en Future Network Services. Naast een duidelijke focus op het wetenschappelijke belang van ieder focusgebied, wordt aandacht besteed aan nieuwe ontwikkelingen, innovaties en toepassingen die in potentie een belangrijke bijdrage hebben aan het oplossen van de grote maatschappelijke uitdagingen zoals geformuleerd in de KIAs en NWA-routes.



KILO-MEGA-GIGA-TERA-PETA-EXA-ZETTA

De hoeveelheid data die we verzamelen is onvoorstelbaar groot. In 2025 praten we al over meer dan 180 zettabytes. Deze exponentiële ontwikkeling stelt techreuzen, zoals Google, in staat om machine learning modellen te maken die voorspellingen produceren die de vaardigheden van een mens te boven gaan.

Dit zijn spannende ontwikkelingen voor potentiële toepassingen van medische diagnoses tot het verbeteren van de verdeling van duurzame energie, maar ze brengen ook een aantal uitdagingen voor onderzoek en praktijk met zich mee. Hoe prepareren we efficiënt en effectief de extreem grote volumes van data voor analyses en hoe behouden we hun waarde over de tijd? De focus van de data science gemeenschap in het komende decennium is het creëren van efficiënte gedistribueerde methoden voor het rekenen met exponentieel groeiende hoeveelheden data, zodat de omvang van de verzamelde data in de praktijk niet overweldigd en niet leidt tot fouten. Een andere uitdaging is de definitie van mechanismen voor de toegankelijkheid van deze rijkdom aan data, ofwel het beschrijven van data en de gebruikte modellen zodat ze vindbaar, toegankelijk, uitwisselbaar en herbruikbaar (FAIR) zijn.

BIJLAGEN

BIJLAGE 1. SAMENSTELLING IPN BESTUUR EN SCHRIJFTEAM

Dit sectorbeeld is tot stand gekomen onder coördinatie van ICT research platform Nederland (IPN). Dit sectorbeeld bevat inbreng van alle leden.

Het bestuur van IPN wordt gevormd door:

Catholijn Jonker	Technische Universiteit Delft, Universiteit Leiden
Gerard Barkema	Universiteit Utrecht
Andy Pimentel	Universiteit van Amsterdam
Patricia Lago	Vrije Universiteit
Han la Poutre	Centrum voor Wiskunde en Informatica, Technische Universiteit Delft

Het bestuur van IPN wordt ondersteund door:

Femke Stephan	NWO
Esther Vleugel	NWO

Samenstelling van de schrijfcommissie voor dit sectorbeeld

Gerard Barkema (vz)	Universiteit Utrecht
Ton de Kok	Centrum voor Wiskunde en Informatica
Mark Winands	Maastricht University
Tanja Vos	Open Universiteit
Arjen de Vries	Radboud Universiteit
Paris Avgeriou	Rijksuniversiteit Groningen
Alan Hanjalic	Technische Universiteit Delft
Arie van Deursen	Technische Universiteit Delft
Bettina Speckmann	Technische Universiteit Eindhoven
Johan Lukkien	Technische Universiteit Eindhoven
Marie Postma	Tilburg University
Alfons Hoekstra	Universiteit van Amsterdam
Aske Plaat	Universiteit Leiden
Marieke Huisman	Universiteit Twente
Johan Jeuring	Universiteit Utrecht
Jaap Heringa	Vrije Universiteit
Dick de Ridder	Wageningen University
Bedir Tekinerdogan	Wageningen University

Coördinatie, schrijfwerk en redactie van het sectorbeeld was in handen van:

Cocky de Wolf	Universiteit Utrecht
---------------	----------------------

Bijdragen in tekst en beeld zijn geleverd door vele betrokken onderzoekers (schrijfteams focusgebieden) en door de special interest groups van IPN (thematische insets).

We zijn de volgende mensen zeer erkentelijk voor hun waardevolle feedback en het tegenlezen van de tekst: Maarten van Steen (Universiteit Twente), Inald Lagendijk (Topsector ICT en Nederlandse AI-coalitie), Frits Grotenhuis (Topsector ICT) en Marcel Staring (I-vakmanschap, ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties).

BIJLAGE 2. DE ICT-SECTOR: EEN ARBEIDSMARKTANALYSE

Analyse van de arbeidsmarkt: vraag naar ICT-specialisten tot 2030. De verregaande digitalisering van de maatschappij is een internationale trend die door de COVID-19 pandemie nog verder in een stroomversnelling is gekomen. Deze verschuiving naar een digitale samenleving gaat gepaard met een steeds grotere behoefte aan (hoog)opgeleide ICT-specialisten in zo goed als alle sectoren. De Arbeidsmarktonderzoeken ICT met topsectoren 2019 (Berenschot en CentERdata), 2020 (CentERdata), en 2021 (CentERdata) in opdracht van het CA-ICT³² laten daarbovenop zien dat Nederland over de volle breedte van de arbeidsmarkt een digitaal vaardiger beroepsbevolking nodig heeft om goed mee te kunnen, of zelfs voorop te lopen, in de digitale revolutie.

De Europese Commissie heeft als ambitie in haar Digitale Agenda opgenomen dat Europa in 2030 20 miljoen ICT-specialisten telt (~ 10% van de professionals)³³. In 2021 was dit percentage voor Nederland 6,7% (EU-breed < 5%) volgens het meest recente rapport van de 'Digital Economy and Society Index' (DESI, 2022)³⁴. Bij een gelijkblijvende grootte van de beroepsbevolking vertaalt zich dit in de komende 8 jaar naar een behoefte aan ~300.000 extra ICT-specialisten in Nederland alleen. Er is echter nu al een tekort aan voldoende ICT-specialisten. Uit een werkgeversonderzoek van het UWV³⁵ blijkt dat 63% van de in 2021 ontstane vacatures in de ICT-sector moeilijk vervulbaar is.

De Eurostat database³⁶ laat in recente jaren een explosieve groei zien in het aantal banen in de ICT-sector. Zo groeide in de laatste vijf jaar het aantal banen in de sector in Nederland met 43% van 433,9K fte in 2017 naar 620,6K fte in 2021. Dit beeld van 30-40% groei wordt bevestigd door een recent arbeidsmarktonderzoek³⁷ onder Nederlandse werkgevers. Het onderzoek wijst voorts uit dat éénderde van deze groei op masterniveau ligt, en dat tweederde van de posities met professionals op bachelorniveau (hbo en wo) wordt ingevuld. Als deze groei aanhoudt richting 2030 zoals de DESI voorspelt, zal Nederland in de komende acht jaar dus een arbeidsmarktbehoefte hebben van 100.000 ICT-specialisten met een masteropleiding. Bij een evenwichtige verdeling over de aangegeven periode komt dit neer op 12.500 alumni per jaar.

Het Research centrum voor Onderwijs en Arbeidsmarkt (ROA) van de Maastricht University geeft in haar arbeidsmarktinformatiesysteem³⁸ een vergelijkbare prognose af voor Nederland, al zij het behoudender. Het ROA voorspelt over de gehele periode van 2020 tot 2026 een instroom op de arbeidsmarkt van 15.300 gediplomeerden op masterniveau in de Informatica en Electrotechniek (hieronder vallen diverse Informatica masteropleidingen waaronder Technische Informatica en Computer Science), tegenover een arbeidsmarktbehoefte (vervanging en uitbreidingsvraag) van 19.400 professionals. Op bachelorniveau ziet het ROA een veel groter tekort ontstaan in de komende periode. Voor iedere bachelor alumnus ontstaan 2,4 baanopeningen tot 2026 (21800 alumni/52100 banen). De berekeningen van het ROA lijken te behoudend.

32 Onderzoek - CAICT (de drie opeenvolgende onderzoeken zijn downloadbaar via deze pagina)

33 Europa's digitaal decennium: doelstellingen voor 2030 | Europese Commissie

34 Human Capital and Digital Skills in the Digital Economy and Society Index | Shaping Europe's digital future (europa.eu)

35 Ongekende krapte op de ICT-arbeidsmarkt (werk.nl)

36 Statistics | Eurostat (europa.eu)

37 NIDAP rapport in opdracht van de 4TU ihkv het sectorplan onderwijs bètatechniek (link). Oplevering wordt in Q4 2022 verwacht, het concept is op verzoek verkrijgbaar.

38 Arbeidsmarktprognoses tot 2026 per opleidingstype (maastrichtuniversity.nl)

Uit het kwantitatieve onderzoek van CentERdata voor CA-ICT blijkt dat de vraag naar vaardigheden op het gebied van big data analytics en onder andere AI, IoT en cybersecurity in de periode sinds 2012 als snelste is gestegen in vacatures in Nederland. Dit geldt ook voor de vraag naar vaardigheden op het gebied van robotica, blockchain, cloud computing en 3D-printing. Verder wijst het vacature onderzoek op een verdubbeling in de vraag naar vaardigheden omtrent 'Gespecialiseerde software', 'Projectbeheerssoftware' en 'Digitale transformatie', waarbij de laatste een categorie is die grotendeels vaardigheden omvat die betrekking hebben op de industriële revolutie 4.0.

Aanbod van informatici op de arbeidsmarkt. De cijfers in dit rapport en diverse andere rapporten laten zien dat de studentenaantallen in de universitaire informaticaopleidingen sterk zijn gestegen in recente jaren. Slechts één op de vijf ICT-specialisten en alumni uit informaticaopleidingen in Europa is vrouw³⁹. Door de gebrekkige participatie van vrouwen blijft niet alleen een groot potentieel onbenut, het gebrek aan diversiteit (in brede zin) beïnvloedt ook op een ongewenste manier de ontwikkeling en toepassing van digitale technieken. De scheve man-vrouw verhouding is al aanwezig vanaf de instroom in de informaticaopleidingen.

Analyse van het Informatica studentenlandschap door de Universiteit Twente laat zien dat sinds 2017 gemiddeld 70% van de universitaire bachelor alumni doorstroomt naar een masteropleiding⁴⁰. 30% start na de wo-bachelor aan een carrière. Hbo-bachelor alumni geven er daarentegen overwegend de voorkeur aan om na de opleiding toe te treden tot de arbeidsmarkt (90%). Jaarlijks ronden ongeveer 2000-2500 studenten succesvol een masteropleiding met een grote informatica-component af (zie Figuur 4a, en bijlage 4). Dit aantal neemt in de komende periode toe vanwege de toegenomen instroom in de bachelor maar kan bij lange na niet aan de behoefte vanuit de ICT-sector voldoen (door DESI geschat op 12.500 gediplomeerden per jaar).

Alumni uit diverse andere disciplines, met name de bètawetenschappelijke opleidingen, vinden ook hun weg richting een baan in de ICT-sector, zoals blijkt uit de cijfers van de ROA. Daarnaast bieden diverse (bekostigde en particuliere) kennisinstellingen leergangen, modulair onderwijs, en omscholingstrajecten aan voor zij-instromers en voor ICT-professionals die zich willen blijven ontwikkelen. Vanwege de grote arbeidsmarktkrapte worden veel omscholingstrajecten richting de IT via leersubsidies gestimuleerd vanuit overheidswege, o.a. via de Human Capital Agenda-ICT⁴¹. Daarnaast bieden werkgevers steeds vaker leer- en omscholingstrajecten aan als onderdeel van de secundaire arbeidsvoorwaarden. Zowel voor zij-instromers als doorstroom is een goed aanbod van onderwijs voor professionals zeer wenselijk. Berenschot doet in het Arbeidsmarktonderzoek ICT met topsectoren 2019 een negental aanbevelingen hoe onderwijsinstellingen, werkgevers en overheid kunnen (samen)werken naar een digitaal vaardigere beroepsbevolking. Deze aanbevelingen sluiten grotendeels aan bij de vijf actielijnen voor de universiteiten zoals die geformuleerd zijn in het sectorplan Onderwijs Bètatechniek 2020⁴².

39 Human Capital and Digital Skills in the Digital Economy and Society Index | Shaping Europe's digital future (europa.eu)

40 Public projects | Sectorplan onderwijs | BI-Studio (utwente.nl)

41 Homepage | HCA ICT

42 Sectorplan Onderwijs Bètatechniek - definitief (4tu.nl)

BIJLAGE 3. DE FOCUSGEBIEDEN IN 2022

We verwezenlijken onze sectorplanambities binnen het onderzoek en onderwijs door gericht in te zetten op versterking van het universitaire landschap in specifieke focusgebieden. Voor Sectorplan 1 is de volgende indeling in zeven focusgebieden gemaakt die nog steeds relevant is:

1. Data modelleren en analyseren
2. Machinaal leren
3. Machinaal redeneren en interactie
4. Algoritmie
5. Software
6. Security en privacy
7. Genetwerkte computer- en embedded systemen

1. Data modelleren en analyseren. De opkomst van big data als basis voor begrip van bedrijfsprocessen en nieuwe ontwikkelingen in de wetenschap en maatschappij vormt een voortdurende uitdaging, door de hele data life cycle: van modellering, organisatie, verwerking, opslag, analyse tot en met de visualisatie van data en besluitvorming. De hoeveelheid en diversiteit van data, verzameld uit een grote verscheidenheid van bronnen (sensoren, sociale media, multimediale databanken, open web, etcetera) leidt tot diverse fundamentele vragen. Welke data moeten geselecteerd worden, en voor welke verwerking, zonder daarbij grondwaarden als privacy uit het oog te verliezen? Willen we data centraal analyseren, opslaan en verwerken? Hoe gaan we daarbij om met de bijbehorende veiligheidsrisico's, of is decentralisatie van dataverwerking een beter alternatief, waarin privacy en veiligheid beter te garanderen zijn? Hoe verhoudt decentralisatie zich tot schaalbaarheid van analyse? Antwoorden op deze vragen vereisen doorontwikkeling van theorie, methodologie en tools in de informatica.

Moderne data-verwerkende systemen ondersteunen niet alleen processen met een kern van Machine Learning (ML), maar bevatten zelf ook grote componenten op basis van ML. Daarmee is *'Machine Learning Operations'* één van de grote uitdagingen voor de toekomst. Het doel daarbij is om producten te kunnen ontwikkelen op basis van machinaal leren die net zo betrouwbaar en valideerbaar zijn als andere software. Data-driven AI systemen moeten voldoen aan toenemende eisen op het gebied van complexiteit, data volumes, schaalbaarheid, flexibiliteit en uiteindelijk energie-efficiëntie. De manier waarop gegevens worden gemodelleerd en pipelines worden ontworpen, bepaalt hoe ze presteren, evolueren in aanwezigheid van storingen en hoe ze toekomstbestendig kunnen worden gemaakt. Hierdoor kunnen veranderingen als gevolg van nieuwe functionaliteit, regelgeving en maatschappelijke eisen duurzaam worden toegepast met geen tot minimale uitvaltijd. Big data en ML vereisen veel resources, zowel in energieverbruik als benodigde hardware. Hoe is dit, in het kader van die andere belangrijke transitie op duurzaamheid en energie, terug te brengen zonder op kwaliteit in te leveren?

2. Machinaal leren. In de afgelopen 10 jaar heeft ML zich stormachtig ontwikkeld door een combinatie van toenemende computerkracht, het internet en de enorme beschikbaarheid van data en nieuwe rekentechnieken. Deze *lerende* systemen zijn in staat hun gedrag aan te passen aan de data die ze waarnemen en worden bijvoorbeeld ingezet om de zorg betaalbaar te houden, energievoorziening en transport te optimaliseren, handelsprocessen te automatiseren, en toezicht te houden op het bankverkeer.

Varianten van deep learning, zoals het gebruik van sterk gelaagde neurale netwerken voor het leren van patronen, worden inmiddels veelvuldig gebruikt in de praktijk. Nederland loopt voorop in het ontwikkelen van nieuwe algoritmen die *grootschalige ML* sneller en energiezuiniger kunnen maken, en die kunnen leren in de praktijk door interactie aan te gaan met hun omgeving. Daarnaast wordt veel baanbrekend onderzoek gedaan naar ML-technieken die ook geschikt zijn voor *kleine datasets*, door effectief de beschikbare domeinkennis (zowel bij menselijke experts als in rekenmodellen, zoals bij *physics-* en *biology-informed learning*) en klassieke modellen te combineren met ML-technieken en geleerde modellen te transfereren naar nieuwe taken. Nederland is toonaangevend in het beschrijven en opsporen van causale verbanden die nodig zijn om data juist te interpreteren.

De enorme toename van ML leidt ook tot grote uitdagingen. Zo leidt het combineren van lerende systemen tot complex, moeilijk te voorspellen gedrag, wat toepassing in kritische situaties en autonome systemen belemmert. En de selectie van data die gebruikt wordt voor het leerproces kan grote gevolgen hebben voor het resultaat, wat risico's met zich meebrengt tot discriminatie en maatschappelijke uitsluiting. Er is daarom een grote behoefte aan methodologie voor *eerlijke*, *uitlegbare* en *betrouwbare* ML-technieken die voorspelbaarheid van systemen garanderen en de rechten en privacy van mensen respecteren.

3. Machinaal redeneren en interactie. Naast de snelle ontwikkelingen in de zelflerende AI, die sterk zijn in patroonherkenning, is er grote behoefte aan AI-systemen die kunnen redeneren op een abstracter en algemener niveau. De volgende stap in de evolutie van AI naar intelligentie op menselijk niveau is daarom machinaal *redeneren*; het vermogen om geleerde kennis toe te passen op nieuwe situaties. Vooral het combineren van machinaal redeneren en zelflerende algoritmen is veelbelovend. DeepMind's AlphaZero, die verschillende spellen zoals schaken en Go op bovenmenselijk niveau kan spelen, is een goed voorbeeld van de doorbraak die kan worden bereikt wanneer een redeneertechniek zoals 'heuristisch (Monte-Carlo) zoeken' en deep learning worden gecombineerd.

Verdere integratie van deze methoden zal de kwaliteit van geautomatiseerde besluitvorming verhogen, ongeacht of deze wordt gebruikt om autonoom beslissingen te nemen, of om een menselijke planner/operator een scala aan verstandige opties te bieden. Machinaal redeneren is essentieel voor AI omdat voor verantwoorde besluitvorming moet worden nagedacht over de gevolgen van toekomstige beslissingen. Machinaal redeneren moet rekening houden met de betrokken mensen en hun voorkeuren, en de (redenen voor deze) beslissingen moeten gebaseerd zijn op beschikbare gegevens én verklaarbaar zijn voor menselijke experts en beleidsmakers. Dit leidt tot zogeheten *Hybrid Intelligence*, waarbij mens en machine elkaars capaciteiten aanvullen. Zulke AI-systemen die de samenwerking tussen mens en machine mogelijk maken, staan ook wel bekend onder de term *mensgerichte AI*. Onderzoek op het gebied van mensgerichte AI richt zich op hoe AI mensen kan ondersteunen bij vele vitale toepassingen, waaronder onderhandelen en groepsbesluitvormingsprocessen, beslissingsondersteuning in de gezondheidszorg, personeelsbeleid, slimme (smart) industrie, slimme en duurzame landbouw, (gepersonaliseerd) nieuws en nieuwe vormen van toegang tot culturele en/of historische collecties. De interactie tussen mens en intelligente machines is essentieel om te komen tot technieken die onze normen en waarden meenemen. De grote vragen en uitdagingen waarvoor we staan zijn: Hoe slaan we een brug tussen de AI van regels die gemakkelijk te doorgronden zijn en de AI die leert uit data? Hoe communiceren mensen met intelligente machines terwijl hun interne representaties volstrekt verschillen? Hoe kunnen we transparante AI systemen ontwikkelen, die mensen heldere uitleg verschaffen over geautomatiseerde beslissingen, zonder concessies te doen wat betreft prestaties en



QUANTUM COMPUTING

Een kwantumcomputer is een radicaal nieuwe computer die bepaalde berekeningen sneller uit zal kunnen voeren dan klassiek ontworpen computers ooit zullen kunnen. Toepassingen omvatten enorme verbeteringen voor optimalisatie, machinaal leren, kwantumchemie en -materialen, maar er is ook het risico dat de op dit moment gangbare technieken voor informatiebeveiliging door de enorme rekenkracht verbroken zullen worden.

Kwantumcomputers werken op basis van kwantumeffecten, zoals superpositie, interferentie en verstrengeling; ze rekenen met kwantumbits, of qubits, in plaats van de bekende klassieke bits die enkel 0 of 1 kunnen zijn. Gelukkig kunnen kwantumeffecten ook gebruikt worden om nieuwe kwantumcommunicatie te realiseren, waarvan de beveiliging gegarandeerd wordt door de wetten van de fysica.

De huidige kwantumcomputers hebben een beperkt aantal qubits en zijn verre van perfect. Daarom wordt er onderzoek gedaan naar toepassingen en algoritmen met weinig qubits die het desalniettemin beter doen dan klassieke algoritmen. Tegelijkertijd worden manieren ontwikkeld om kwantumcomputers te testen, meten, verifiëren en debuggen. De compleet andere aard van kwantumcomputers vraagt om fundamenteel nieuwe algoritmen, maar verandert ook drastisch wat we weten over de grenzen van wat we kunnen doen met nieuwe computertechnologieën.

gebruiksvriendelijkheid? Hoe kunnen we meten én voorkomen dat AI bepaalde groepen benadeelt? Hoe kunnen we ervoor zorgen dat mensen controle houden over persoonlijke gegevens die een AI systeem gebruikt, en toezicht kunnen houden op de beslissingen van een AI systeem? Deze fundamentele vragen liggen al decennia voor, maar zijn door de snelle ontwikkelingen in de zelflerende AI nu urgenter dan ooit. Een multidisciplinaire aanpak, waarbij informatica samenwerkt met geesteswetenschappen en sociale wetenschappen, is cruciaal voor het aanpakken van deze uitdagingen.

4. Algoritmiek. De algoritmiek houdt zich bezig met het ontwikkelen van nieuwe methoden om complexe berekeningsproblemen op te lossen. De nadruk ligt daarbij op methoden waarvan men kan aantonen dat ze efficiënt opschaalgedrag vertonen, en die bewijsbaar correcte resultaten geven. Deze fundamentele aanpak maakt de algoritmiek tot een van de pijlers van de informatica. Het algoritmiekonderzoek in Nederland behoort al vele jaren tot de wereldtop. De snelle toename van de hoeveelheid data waarmee gerekend moet worden in combinatie met de steeds ingewikkelder taken waarvoor algoritmen ingezet worden, maakt dat het belang van efficiënte algoritmen continu blijft toenemen. Daarnaast breidt het aantal deel- en toepassingsgebieden van de algoritmiek zich nog altijd uit. Naast de klassieke graaf, geometrie, string, en optimaliseringsproblemen wordt onder andere onderzoek gedaan naar vraagstukken betreffende het energienet, klimaat- en omgevingsmodeller, logistiek, gezondheidszorg, visualisering, data science, machinaal leren, en AI.

Deze moderne toepassingen met heterogene, soms gedistribueerd opgeslagen datasets die voortdurend aan veranderingen onderhevig zijn, leiden tot nieuwe algoritmische uitdagingen. Daar komt bij dat de data lang niet altijd betrouwbaar is: meetgegevens (zoals GPS-coördinaten of sensordata) zijn niet 100% nauwkeurig en soms is een deel van de data simpelweg incorrect. Het is daarom noodzakelijk om algoritmen te ontwikkelen die met onzekerheid in de data kunnen omgaan. Bovendien komen er allerlei nieuwe paradigma's op (denk aan quantum algoritmen of *programmable matter*, alsmede gedistribueerde en streaming algoritmen, en nieuwe conditionele ondergrenzen) en ook nieuwe kwaliteitsmaten voor algoritmen (zoals een focus op energiegebruik, in plaats van op rekentijd of geheugengebruik). Bij al deze nieuwe toepassingen en paradigma's blijven betrouwbaarheid en schaalbaarheid van de ontwikkelde algoritmen, en verklaarbaarheid en kwaliteit van de resultaten, essentieel. Fundamenteel algoritmisch onderzoek is en blijft daarom van groot belang.

5. Software. Software ligt aan de basis van de oprukkende digitalisering van onze samenleving, met directe gevolgen voor de industrie, dienstverlening, overheid, onderwijs, gezondheidszorg, en alle takken van wetenschap. Software engineering staat voor het systematisch ontwerpen, ontwikkelen, verifiëren, testen, én onderhouden van software. Moderne industriële software bestaat uit miljoenen regels code en vormt de basis van digitale toepassingen in o.a. auto's, vliegtuigen, medische robots, de financiële sector, gezondheidszorg en de publieke sector. Door de groeiende verwevenheid van software met ons dagelijks leven is de vraag op de arbeidsmarkt naar hoogopgeleide software specialisten sterk toegenomen en zijn de grote uitdagingen voor het software-onderzoek steeds actueler geworden. In haar **Technology Trends Outlook 2022**, identificeert McKinsey 'next generation software development' dan ook als één van de belangrijkste technologische trends van de komende jaren.

De Nederlandse software onderzoekers, verenigd in VERSEN, hebben in 2020 een manifest gepubliceerd waarin zij aangeven dat zij in de komende periode de volgende vier belangrijke maatschappelijke en technologische uitdagingen willen adresseren: (1) hoe geven we garanties over de betrouwbaarheid van softwaresystemen, zodat het voldoet aan de maatschap-

pelijke behoefte, en bestand is tegen onorthodox gebruik, (2) hoe realiseren we significante verbeteringen in de efficiëntie en effectiviteit van het ontwikkelproces van softwaresystemen nu de doorontwikkeling van software in een stroomversnelling is geraakt, (3) hoe verbeteren we de flexibiliteit, onderhoudbaarheid en daarmee de duurzaamheid van bestaande softwaresystemen? (4) hoe leiden we voldoende nieuwe software engineers en wetenschappers op om de aan de maatschappelijke behoefte te voldoen en de digitale transitie in goede banen te leiden?

6. Security en privacy. De veiligheid van informatiesystemen en kritische infrastructuur is cruciaal voor het in stand houden van de Nederlandse welvaart: zonder een veilig fundament maakt Nederland zich niet alleen kwetsbaar, maar ook onaantrekkelijk voor economische bedrijvigheid. De digitale samenleving is kwetsbaar voor aanvallen van buitenaf, maar ook voor de systematische verzameling, analyse en exploitatie van data door Big Tech en statelijke actoren. De motieven zijn nu nog vooral financieel, maar ook meer en meer strategisch/politiek. In de woorden van EU Commissaris Thierry Breton⁴³, “*we need to build a proper cybersecurity shield for the coming decades*”. Hij noemt daarbij eveneens supply chain security en quantum computing als strategische onderwerpen.

Nederland heeft een uitstekende wetenschappelijke reputatie op het gebied van cybersecurity en cryptografie. De onderzoekers, verenigd in ACCSS, formuleerden de fundamentele onderzoeksvragen op dit gebied in de nationale cyber security research agenda (NCSRA III). De eerste grote uitdaging voor Informatica is hoe de (on)veiligheid van een systeem aangetoond kan worden en hoe eventuele kwetsbaarheden automatisch te detecteren en repareren zijn. De tweede, even belangrijke, uitdaging betreft methoden om computersystemen en kritische infrastructuur te ontwikkelen die secure zijn by design—niet alleen vandaag, maar ook in een toekomst waarin de cryptografische fundamentele van deze systemen bestendig moeten zijn tegen de dreiging van krachtige quantumcomputers. Hoe goed de eerste twee punten ook worden opgelost, cybercriminaliteit en statelijke actoren zullen altijd deel uitmaken van ons leven. Daarom is de derde essentiële uitdaging gericht op methoden om aanvallen op te sporen en erop te reageren—altijd vanuit een beter begrip van de economische aspecten van cyberbeveiliging en de strategieën van de aanvallers. Tot slot is er de vierde uitdaging: hoe privacy en policy compliance in de gedigitaliseerde samenleving te garanderen, terwijl de grenzen van technologische oplossingen nog onduidelijk zijn en wet- en regelgeving noodzakelijk blijven om bescherming af te dwingen, maar dezelfde wet- en regelgeving jaren achterloopt op technologische ontwikkelingen. Het is daarvoor cruciaal dat onderzoek in een vroeg stadium privacy knelpunten identificeert, zodat deze waar mogelijk vermeden kunnen worden door *privacy-by-design* principes in praktijk te brengen en gebruikers controle te geven over wat er met hun data gebeurt.

7. Genetwerkte computer- en embedded systemen. Computersystemen vormen de essentiële infrastructuur voor de Nederlandse topsectoren en innovatiegebieden, en zullen een grote rol spelen in de noodzakelijke energietransitie. Innovaties binnen het domein van computersystemen zijn in veel gevallen instrumenteel geweest voor belangrijke ontwikkelingen binnen de informatica (zoals b.v. Cloud Computing, Big Data en de huidige AI revolutie) en zullen dit in de toekomst blijven doen. Veel van deze computersystemen zijn niet als zodanig te herkennen maar zitten ingebed in grotere apparaten zoals auto's, vliegtuigen, medische apparatuur, slimme gebouwen, robotica, enz. Daarnaast zijn toekomstige computersystemen meer en meer genetwerkt (via o.a. 5G en beyond 5G netwerken), en zullen

ze in toenemende mate gedistribueerd en autonoom worden. Daarbovenop zullen veel systemen te maken hebben met extreem hoge kwaliteitseisen (zoals Cyber Physical Systems) en betrokken zijn bij het grootschalig vergaren van data over artefacten (objecten, processen) in de fysieke wereld (zoals sensornetwerken en in het 'Internet of Things'). Dit domein van *genetwerkte computer- en embedded systemen* vormt op dit moment een van de grootste IT-sectoren ter wereld. Het onderzoek aan Nederlandse universiteiten op het gebied van (genetwerkte) computer- en embedded systemen is excellent, en heeft zich verenigd in de landelijke IPN Special Interest Group 'Future Computer Systems and Networking'.

De wetenschappelijke uitdagingen liggen niet alleen in de realisatie en miniaturisatie van de computersystemen maar ook in hun energieconsumptie, betrouwbaarheid en duurzaamheid. Daarnaast is de snel toenemende complexiteit van de systemen een extra complicerende factor: computersystemen integreren steeds meer processoren, vaak heterogeen, soms in een gedistribueerde context, en mogelijk ook resulterend in complexe systemen-van-systemen (zoals b.v. zijn te vinden in het zogenaamd Edge-to-Cloud continuüm). Tevens dient de niet-duurzame klimaatvoetafdruk van grootschalige inzet van computersystemen zelf binnen onze huidige en toekomstige ICT infrastructuur ook geadresseerd te worden. Dit vraagt om de ontwikkeling van nieuwe, effectieve (software-)oplossingen voor een integrale aanpak van ontwerp, analyse en optimalisatie van de hardware en software voor deze genetwerkte computersystemen. Oplossingen die efficiënt en effectief met de complexiteit, heterogeniteit en dynamiek van deze systemen om kunnen gaan en deze beheersbaar maken.

BIJLAGE 4. LANDELIJKE KENGETALLEN VAN HET UNIVERSITAIRE INFORMATICA ONDERWIJS EN ONDERZOEK

ONDERWIJS

Studenten	2018-2019	2019-2020	2020-2021	2021-2022
Bachelor	8291	9422	10853	11568
% vrouw	17%	19%	20%	21%
Master	5363	6101	7140	7946
% vrouw	20%	21%	22%	23%
Totaal	13654	15523	17994	19514
% vrouw	18%	20%	21%	22%

Eerste jaar	2018-2019	2019-2020	2020-2021	2021-2022
Bachelor	2211	2556	2859	2887
% vrouw	21%	22%	23%	22%
Master	2244	2450	2872	3149
% vrouw	23%	24%	24%	25%
Totaal	4454	5006	5731	6036
% vrouw	22%	23%	24%	23%

Diploma's	2018-2019	2019-2020	2020-2021	2021-2022
Bachelor	1030	1203	1415	1686
% vrouw	15%	17%	18%	20%
Master	1423	1674	1793	2264
% vrouw	22%	22%	22%	26%
Totaal	2453	2877	3208	3950
% vrouw	19%	20%	20%	23%

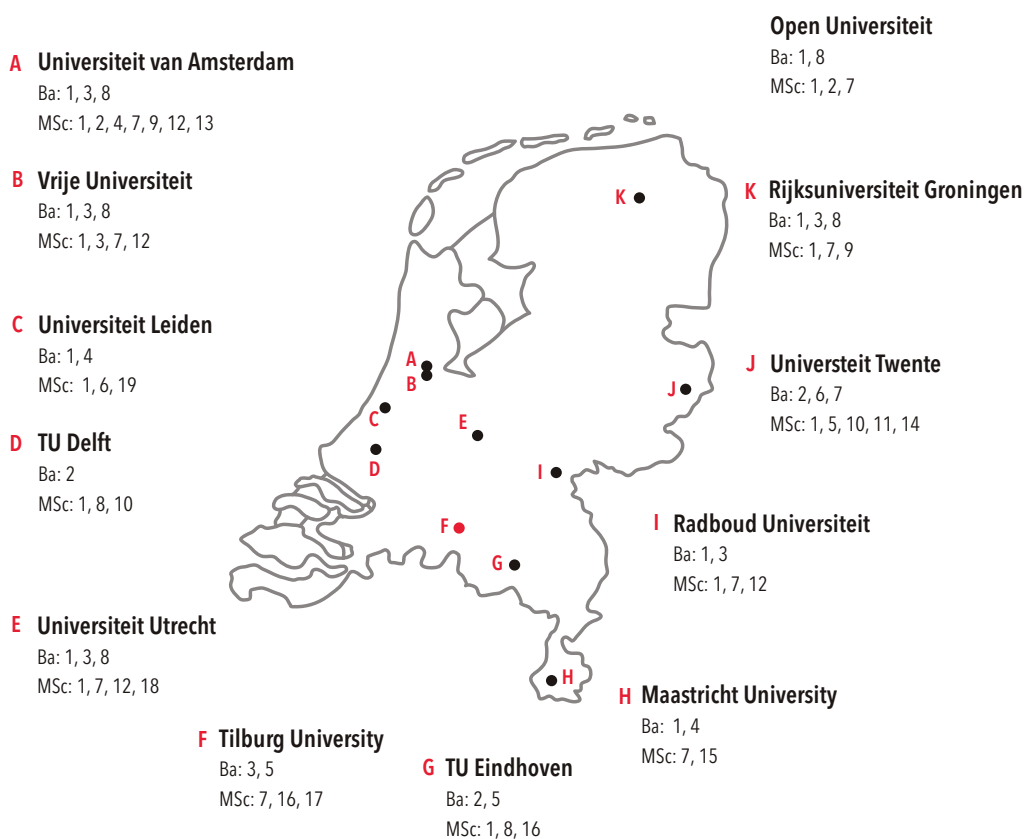
De cijfers zijn per peildatum 1 oktober van het betreffende academische jaar. Data is afkomstig uit de openbare onderwijsregisters van DUO. De opleidingen/croho labels die hier meegenomen zijn staan weergegeven in het overzicht in bijlage 5. Van gedeelde opleidingen is een percentage meegenomen.

ONDERZOEK

Diploma's	2018	2019	2020	2021
WP vast	472	536	611	667
% vrouw	19%	20%	21%	23%
WP tijdelijk	821	862	1011	1128
% vrouw	21%	24%	27%	27%
Totaal	1293	1398	1622	1795
% vrouw	20%	22%	25%	26%

De gegevens met betrekking tot personele bezetting zijn aangeleverd door de deelnemende universiteiten. De peildatum is 31 december van het betreffende kalenderjaar. De universiteiten die hier meegenomen zijn, zijn: LEI, OU, RU, RUG, TUD, TU/e, TiU, UvA, UM, UT, UU, VU.

BIJLAGE 5. OPLEIDINGEN OVERZICHT VAN HET UNIVERSITAIRE INFORMATICA EN INFORMATIEKUNDE ONDERWIJS



Bacheloropleidingen

1. Informatica (croho 56978, 59326, 50426)
2. Technische Informatica (croho 56964, 59335, 50447)
3. Kunstmatige Intelligentie (croho 56981, 56945, 59338)
4. Data Science and Artificial Intelligence (croho 50300)
5. Data Science (croho 55018)
6. Business Information Technology (croho 56066)
7. Creative Technology (croho 50447)
8. Informatiekunde (croho 56842, 56869)

Masteropleidingen

1. Comput(er)ing Science (and Engineering) (croho 60300, 65014, 60364, 66978, 60438)
2. Software Engineering (croho 60228)
3. Computer Security (croho 60802)
4. Security and Network Engineering (croho 60227)
5. Interaction Technology (croho 60030)
6. Media Technology (croho 60206)
7. Artificial Intelligence (croho 66981, 60969)
8. Data Science and AI (Technology) (croho 60976)
9. Computational (Cognitive) Science (croho 60653, 65015)
10. Embedded Systems (croho 60331)
11. Robotics (croho 60973)
12. Information Science(s)/Studies (croho 60255, 60809, 60229)
13. Logic (croho 60226)
14. Business Information Technology (croho 60025)
15. Data Science for Decision Making (croho 60125)
16. Data Science in Business and Entrepreneurship (croho 65018)
17. Data Science & Society (croho 60964)
18. Applied Data Science (croho 60971)
19. ICT in Business and the Public Sector (croho 60205)

BIJLAGE 6. BEKNOPT SAMENVATTING ONDERZOEKSVISITATIE 2015-2020

Alle onderzoekseenheden van universiteiten en NWO-en KNAW-instituten worden eens per zes jaar extern geëvalueerd. Deze evaluatie gebeurt volgens het SEP (Standaard Evaluatie Protocol), opgesteld door de VSNU, NWO en KNAW. Eenheden worden beoordeeld op drie criteria: (1) wetenschappelijke kwaliteit van het onderzoek en bijdrage aan wetenschappelijke kennis, (2) maatschappelijke relevantie, en (3) levensvatbaarheid; het vermogen om de wetenschappelijke en maatschappelijke ambities te realiseren.

De meest recente onderzoeksvisitatie van de Informatica departementen en instituten in Nederland is uitgevoerd volgens SEP protocol 2021-2027 in januari 2022 door de Onderzoekerij. Deelnemende universiteiten waren: LEI, OU, RU, TUD, TU/e, UvA, UM, UT, UU, en VU.

De algemene conclusies van de commissie zijn als volgt:

1. Het onderzoek in de instellingen die zijn beoordeeld, staat er goed voor, met vele excellente voorbeelden van research output en internationaal prominente onderzoekers. De Nederlandse Informatica heeft altijd een sterke positie gehad met kwalitatief goede onderzoekers en grote internationale impact. De commissie komt tot de conclusie dat dit nog altijd het geval is;
2. Bij alle deelnemende instellingen zijn voorbeelden gezien van onderzoekprogramma's met grote maatschappelijke relevantie. Zij presteren ook goed op het gebied van outreach. Er zijn op de korte termijn diverse financieringsmogelijkheden van maatschappelijk relevante onderzoekprogramma's. Voor innovaties en toepassingen op de lange termijn is het noodzakelijk het fundamenteel wetenschappelijk informaticaonderzoek te verstevigen;
3. De levensvatbaarheid van de sector is zeer goed. De commissie heeft echter twee grote zorgen:
 - A. De beperkte financieringsmogelijkheden. Alle afdelingen zijn in afgelopen periode significant gegroeid ondanks een zeer competitieve arbeidsmarkt. Het is essentieel dat financieringsmogelijkheden voor fundamenteel onderzoek in de Informatica verbeteren om het door de sector aangetrokken talent te behouden, en verder te groeien. [...]
 - B. De student-staf ratio van de afdelingen is nog steeds veel te hoog. De commissie raadt de instellingen een tweede Sectorplan aan te vragen voor Informatica om deze disbalans verder te adresseren en de landelijke coördinatie tussen de afdelingen te verstevigen. De commissie adviseert om in een tweede aanvraag alle leden van IPN mee te nemen.

BIJLAGE 7. KWALITEITSKENMERKEN VAN DE SECTOR INFORMATICA (2018-2022)

STANDAARDINDICATOREN

NWO	2018	2019	2020	2021	2022
VENI	2	9	7	7	Nvt
VIDI	4	4	3	2	4
VICI	1	1	1	1	1
TOP	2	6	2		
ERC					
Starting	1	2	2		
Consolidator	2	1			
Advanced	3				
Synergy					
Totaal	15	23	15	10	5

NEDERLANDSE ERKENNINGEN EN BENOEMINGEN

	2018	2019	2020	2021	2022
Stevin Premie				1	
KNAW-benoeming	1		1	1	
<i>Jonge akademie</i>			1		
KHMW-benoeming			1	1	1

INTERNATIONALE ERKENNINGEN EN BENOEMINGEN

	2018	2019	2020	2021	2022
MSCA fellow		1		2	
ACM fellow			1	1	
IEEE fellow					1
Humboldt foundation	1			1	

Onderzoeksgroepen aan alle instellingen in de sector Informatica werken veelvuldig samen in consortia en via publiek-private samenwerkingen in (field)labs, innovatiehubs, proeftuinen en PhD-programma's. De diverse privaat-gefinancierde PhD-labs, waaronder de ICAI-labs, zullen eind 2022 uit meer dan 50 individuele labs bestaan met meer dan 100 partners. Daarnaast is de sector trekker van, danwel deelnemer in, diverse Groeifonds, NWO, NWA, en Horizon projecten. Financiering van onderzoek (samenwerking en training) via de tweede en derde geldstroom is een belangrijke inkomstenbron voor de sector, waarmee de inkomsten uit de eerste geldstroom tenminste worden verdubbeld. Om een indruk te geven van de brede participatie en de omvang is een selectie van projecten opgenomen in de tabel op de volgende pagina. De lijst is verre van compleet.

NWO PERSPECTIEF CONSORTIA

	Jaar	Penvoerder	Deelnemer
EDL: Eff Deep Learn.	2018	TU/e	RU, TUD, UvA, VU
DIGITAL TWIN	2019	RUG	LEI, TUD, TU/e, TiU, UT
MEGAMIND	2020	TU/e	TiU, TUD, UT

NWO ZWAARTEKRACHT CONSORTIA

	Jaar	Penvoerder	Deelnemer
Quantum Software C.	2018	UvA	CWI, LEI, TUD, VU
EsDiT	2020	UT	LEI, TUD, TU/e, UU, WUR
Hybrid Intelligence	2020	VU	LEI, RUG, TUD, UvA, UU
Brainscapes	2020	VU	TUD, LEI, UU
Stress in Action	2022	VU	RUG, UT
ALGOSOC	2022	UvA	EUR, TiU, TUD

NWO KIC CONSORTIA

		Jaar	Penvoerder	Deelnemer
MOCIA	(Crossover)	2020	RU	UMCG, AMC, UT, UM, WUR
ROBUST	(LTP)	2020	UvA	UU, UT, TU/e, JADS, LEI, UM, RU, TUD, EUR
PLANT-XR	(LTP)	2020	UU	TUD, UvA, WUR
LEAPFROG	(KIA-ST)	2022	VU	OU, VUMC, AMC
HEWSTI	(KIA-VEI)	2022	VU	LEI, TUD
AI4Int	(KIA-VEI)	2022	UvA	UU, TU/e, VU

GROEIFONDS (NGF), NWA, TOPSECTOREN (TS)

		Jaar	Penvoerder	Deelnemer
AINed	(NGF)	2022	TUD	VU, TiU, RUG, RU, UM, UU WUR, LEI TU/e, UT, UvA
OLAI	(NGF)	2022	RU	UU, UM
CROP-XR	(NGF)	2022	UU	WUR, UvA, TUD
INTERST	(NWA-ORC)	2020	TU/e	UT, VU, TiU, RU, TUD
Cortex	(NWA-CS)	2019	LEI	UvA, CWI, RU, TUD
Primavera	(NWA-CS)	2019	UT	RU, TU/e
Thesues	(NWA-CS)	2021	TUD	VU, TiU
Catrin	(NWA-CS)	2021	UT	LEI, TUD, TU/e, UvA
Hapkido	(NWA-CS)	2021	TNO	TUD, CWI
C-SIDe	(NWA-CS)	2021	LEI	
PROACT	(NWA-CS)	2021	LEI	RU, TUD
SHARE	(TS-CS)	2020	UT	
Serenity	(TS-CS)	2021	UT	TU/e
Upin	(TS-CS)	2021	UT	UvA
Medusa	(TS-HTSM)	2021	TU/e	
Smart Two	(TS-HTSM)	2021	TU/e	

H2020 / HORIZON

	Looptijd	Naam	Uni (P/D*)
H2020-SU-RIA	2019-2022	Concordia	UT (D)
H2020-ICT-RIA	2019-2022	IV4XR	UU (D)
H2020-SU-RIA	2020-2023	ASSURED	TUD (D)
H2020-SU-RIA	2020-2023	AssureMOSS	TUD (D), VU (D)
H2020-ICT-IA	2021-2023	CoRoSect	UM (P)
H2020-SU-IA	2021-2024	IRIS	TUD (D)
Horizon-AG	2022-2025	Openwebsearch.eu	RU (D)
Horizon-AG	2022-2025	TANGO	TUD (D)

* P = penvoerder, D = deelnemer.

COLOFON

November 2022

INFORMATICA

ICT research platform Nederland (IPN)

Postbus 93460

2509 AL Den Haag

ipn@nwo.nl

FOTOGRAFIE

iStock Photo tenzij anders vermeld

VORMGEVING

WAT ontwerpers, Utrecht

